

UNIVERSITÉ DE LILLE
FACULTÉ DE MÉDECINE HENRI WAREMBOURG
Année : 2022

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MÉDECINE

**Apport de la marche en exosquelette dans la rééducation des patients
paraplégiques : focus sur l'adaptation cardiovasculaire**

Présentée et soutenue publiquement le 25 octobre 2022 à 18 heures
au Pôle Recherche

par Anne-Sophie BOLIK

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Luc DEFEBVRE

Assesseurs :

Monsieur le Professeur André THEVENON

Madame le Docteur Vinciane PARDESSUS

Madame le Docteur Valérie WIECZOREK

Directeur de thèse :

Monsieur le Docteur Jean-Gabriel PREVINAIRE

AVERTISSEMENT

La Faculté n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses : celles-ci sont propres à leurs auteurs

ABREVIATIONS

- **AIS** : ASIA Impairment Scale
- **AVC** : Accident Vasculaire Cérébral
- **FC** : Fréquence Cardiaque
- **MET** : Metabolic Equivalent of Task
- **OMS** : Organisation Mondiale de la Santé
- **TA** : Tension Artérielle
- **TAD** : Tension Artérielle Diastolique
- **TAS** : Tension Artérielle Systolique
- **SCI** : Spinal Cord Injury
- **SNA** : Système Nerveux Autonome

SOMMAIRE

Avertissement	2
Abréviations	4
Résumé	8
Introduction	9
1. La lésion médullaire.....	9
1.1 Définition.....	9
1.2 Epidémiologie.....	9
1.3 Conséquences cliniques.....	10
1.4 Conséquences fonctionnelles.....	11
2. Apport des nouvelles technologies.....	12
2.1 Les exosquelettes.....	12
2.2 Utilisation chez le patient paraplégique.....	13
3. La dysautonomie cardiovasculaire du patient paraplégique.....	13
4. Objectif de l'étude.....	15
Matériel et méthode	16
1. Patients.....	16
2. Exosquelette.....	17
3. Protocole de l'étude.....	18
3.1 Verticalisation sur table.....	19

3.2 Verticalisation en exosquelette	19
4. Analyse des données	20
Résultats	21
1. Patients.....	21
2. Verticalisation sur table.....	22
3. Verticalisation en exosquelette	22
4. Variations des paramètres après 3 semaines de rééducation	24
4.1 Verticalisation sur table.....	24
4.2 Verticalisation en exosquelette	24
5. Comparaison selon la sévérité de la lésion médullaire	24
Discussion	25
1. Principaux résultats	25
2. L'orthostatisme	25
2.1 Physiologie	25
2.2 Chez le blessé médullaire.....	27
3. La marche.....	28
3.1 Physiologie	28
3.2 Chez le blessé médullaire.....	29
4. Hypothèse de travail.....	32
5. Limites de l'étude.....	32
6. Perspectives	32
Conclusion	35

Références bibliographiques	36
Annexes.....	42
Annexe 1 : Score AIS (Asia Impairment Scale) (<i>version française</i>).....	42
Annexe 2 : tendances épidémiologiques récentes	43
Annexe 3 : représentation 3D et arbre cinématique de l'exosquelette Atalante.....	44
Annexe 4 : anatomie du système nerveux autonome	45
Annexe 5 : protocole de l'étude	46
Annexe 6 : tableau des variations de la TAS, de la TAD et de la FC lors des épreuves de tilt lent et de tilt rapide sur table de verticalisation.....	47
Annexe 7 : tableau des variations de la TAS, de la TAD et de la FC lors des épreuves d'orthostatisme statique et de marche en exosquelette	48
Annexe 8 : tableau des variations de la TAS, de la TAD et de la FC lors de l'effort de marche en exosquelette, à vitesse lente et à vitesse rapide.....	49
Annexe 9 : tableau des variations de la TAS, de la TAD et de la FC lors de la verticalisation sur table (tilt lent et tilt rapide), après 3 semaines de rééducation ..	50
Annexe 10 : tableau des variations de la TAS, de la TAD et de la FC lors de la verticalisation en exosquelette (orthostatisme et marche), après 3 semaines de rééducation.....	51

RESUME

Contexte : la dysautonomie cardiovasculaire après une lésion médullaire peut entraver la prise en charge rééducative des patients. Les exosquelettes sont un moyen récent de rééducation mais nous manquons de preuve de leur intérêt dans le réentraînement cardiaque. L'objectif de l'étude était d'observer l'adaptation cardiovasculaire de patients paraplégiques lors de l'effort de marche en exosquelette.

Méthode : Quatre hommes paraplégiques ont été inclus, dont 2 présentant une lésion complète et 2 une lésion incomplète. Des enregistrements de la tension artérielle et de la fréquence cardiaque ont été réalisés lors d'épreuves de verticalisation sur table puis d'orthostatisme statique et de marche en exosquelette. Les enregistrements ont été renouvelés après 3 semaines de rééducation.

Résultats : La verticalisation sur table retrouve une régulation cardiovasculaire altérée chez les 4 patients. Dans l'exosquelette auto-équilibré, 3 patients sur 4 présentent une régulation cardiovasculaire altérée. Lors de la marche en exosquelette, l'adaptation cardiovasculaire est meilleure qu'en position statique, chez 3 patients sur 4. Les variations sont qualitativement similaires après 3 semaines de rééducation. Les patients présentant une lésion médullaire incomplète ont une meilleure régulation cardiovasculaire lors de l'effort de marche que les patients présentant une lésion médullaire complète.

Conclusion : les exosquelettes apportent un moyen novateur de rééducation à la marche. Ils permettent également la réalisation d'un effort physique d'intensité modérée. L'activité physique adaptée chez le patient blessé médullaire est importante pour réduire le risque cardiovasculaire, plus élevé chez ces patients que dans la population générale. La rééducation en exosquelette devrait donc, par tous les avantages qu'elle présente, faire partie intégrante de la prise en charge des patients blessés médullaires.

INTRODUCTION

1. La lésion médullaire

1.1 Définition

Une lésion médullaire se définit comme une atteinte de la moelle épinière et des racines nerveuses ou une atteinte importante des racines de la queue de cheval. Elle a pour conséquences une altération des fonctions motrices, sensitives et neuro-végétatives.

On caractérise une lésion médullaire par son niveau neurologique et sa sévérité. Selon le niveau d'atteinte, on décrit typiquement un tableau de tétraplégie (atteinte au niveau cervical) ou de paraplégie (atteinte au niveau thoracique, lombaire ou sacré).

La sévérité de la lésion peut être appréciée par l'échelle de déficience AIS (ASIA Impairment Scale). D'après cette échelle, les lésions sont classées en lésions motrices complètes (AIS A ou B) ou incomplètes (AIS C ou D) (*Annexe 1*).

1.2 Epidémiologie

Entre 250 000 et 500 000 cas de blessures médullaires sont recensés chaque année dans le monde (1).

En France en 2000, l'incidence des lésions médullaires traumatiques est de l'ordre de 1200 nouveaux cas par an (environ 19,4 nouveaux cas par million d'habitants) (2).

Les causes traumatiques représentent à elles seules plus de la moitié des étiologies de blessure médullaire. Parmi les causes traumatiques, la principale cause reste l'accidentologie routière, dont l'incidence serait rattrapée par les chutes, fréquentes chez les personnes plus âgées (3).

Les hommes sont plus souvent touchés, avec un sex ratio d'environ 4 hommes pour 1 femme. L'âge moyen quel que soit le sexe se situe autour de 42 ans.

L'*Annexe 2* détaille les tendances épidémiologiques récentes.

1.3 Conséquences cliniques

Une lésion médullaire a des conséquences dramatiques sur la vie des personnes. L'atteinte de la moelle épinière est à l'origine d'un tableau de déficiences multi-systèmes, lié aux fonctions physiologiques médiées par la moelle.

Ces symptômes peuvent être :

- Des troubles moteurs et sensitifs
- Des troubles neurovégétatifs (dysautonomie cardiovasculaire, troubles de la sudation ou de la thermorégulation...)
- Des troubles sphinctériens, vésicaux et intestinaux (rétention, fuites...)
- Des troubles génito-sexuels
- Des troubles respiratoires
- Des douleurs
- Autres troubles associés (syndrome métabolique, thromboses veineuses, déminéralisation osseuse, calculs urinaires...)

La présence et l'intensité de ces symptômes est dépendante du niveau et de la sévérité de la lésion.

La prise en charge spécialisée des patients blessés médullaires a permis de considérablement améliorer leur qualité et leur espérance de vie, avec un taux de survie à la phase aigüe de l'ordre de 94 %, et une espérance de vie globale approchant celle de la population générale pour les lésions les moins hautes. La prévention et le traitement des comorbidités par un suivi régulier conditionnent ce pronostic.

1.4 Conséquences fonctionnelles

La plupart des patients présentant une lésion médullaire ont perdu la possibilité de marcher sans aides techniques, rendant l'utilisation du fauteuil roulant (manuel ou électrique) indispensable.

Outre l'atrophie musculaire des membres inférieurs, la station assise prolongée au fauteuil est responsable de complications telles que les escarres (4), l'ostéopénie, l'obésité, les douleurs chroniques, les infections urinaires... De plus, manœuvrer un fauteuil roulant quotidiennement peut engendrer une surutilisation des membres supérieurs responsable de douleurs chroniques d'épaules (5).

L'impact de la perte d'autonomie sur la qualité de vie des patients n'est pas négligeable et la désinsertion sociale est fréquente. D'après l'Organisation Mondiale de la Santé, cette dépendance aurait un impact psychologique important ; on recense environ 20 à 30 % de syndromes dépressifs chez les patients blessés médullaires (1). Le regard porté sur une personne en fauteuil roulant, les difficultés d'accessibilité des

lieux publics sont des exemples de problématiques quotidiennes pouvant impacter psychologiquement ces patients (6).

Le développement de nouveaux moyens de compensation de la marche est donc une problématique importante.

2. Apport des nouvelles technologies

2.1 Les exosquelettes

La recherche et le développement des exosquelettes ont débuté dans les années 1960. Initialement créés dans un but militaire et chez des sujets sains, ils ont ensuite été pensés comme moyen de suppléance chez des sujets présentant une déficience physique. Progressivement, différentes orthèses passives puis actives de membres inférieurs se sont développées (7).

Depuis une vingtaine d'années, le développement de nouvelles technologies pour améliorer la récupération motrice après une lésion nerveuse centrale a explosé (8,9). L'apport en rééducation neurologique est majeur, permettant aux patients atteints d'une lésion neurologique (blessés médullaires, accident vasculaire cérébral (AVC), sclérose en plaque...) d'entretenir et d'améliorer leurs capacités fonctionnelles de marche.

Une revue Cochrane de 2010 a montré que les patients ayant présenté un AVC utilisant l'assistance robotisée à la marche en rééducation en combinaison à la kinésithérapie standard étaient plus à même de récupérer une marche indépendante que les patients n'utilisant pas l'assistance robotisée (10).

2.2 Utilisation chez le patient paraplégique

La perte de la marche est une fonction difficile à compenser chez le patient paraplégique. Le développement des exosquelettes a permis de palier à cette difficulté, et d'ouvrir de nouvelles perspectives de rééducation et de déambulation.

Au-delà de la récupération fonctionnelle, de nombreuses études ont prouvé l'intérêt des exosquelettes de marche dans l'amélioration du transit, la diminution des douleurs chroniques et de la spasticité, l'entretien de la densité minérale osseuse (11–15). L'impact sur la qualité de vie de ces patients n'est pas négligeable.

L'utilisation des exosquelettes est en plein essor. Cependant, chez les patients blessés médullaires, la rééducation et l'utilisation des exosquelettes peuvent parfois être limitées par la dysautonomie (hypotension chronique et hypotension orthostatique) et les difficultés d'adaptation cardiovasculaire à l'effort.

3. La dysautonomie cardiovasculaire du patient paraplégique

L'*Annexe 3* rappelle l'anatomie du système nerveux autonome (SNA).

L'atteinte autonome des patients blessés médullaires, initialement bien moins évaluée que l'atteinte sensitivo-motrice, fait actuellement l'objet de nombreuses études et de standards d'évaluation précis (16–18).

Les manifestations cliniques dysautonomiques observées chez les patients paraplégiques sont directement liées au niveau et à la sévérité de l'atteinte médullaire (19).

L'interruption du contrôle sympathique et la prédominance du système parasympathique en lien avec la lésion médullaire expliquent les perturbations observées chez ces patients. Ces manifestations touchent principalement ceux dont la lésion se situe au-dessus du niveau T6 (20,21).

L'hypotension artérielle est fréquente, et sa chronicité peut entraîner une fatigue et/ou une perte d'endurance, impactant significativement la prise en charge rééducative. L'impact de ces hypotensions sur la qualité de vie des patients est réel, et certaines études ont mis en évidence un lien entre les tensions artérielles basses et la diminution des performances cognitives des patients (22).

L'hypotension orthostatique, symptomatique ou non, peut également impacter la rééducation en entravant la verticalisation.

D'autres phénomènes sont observés, tels que l'hyperréflexie autonome (augmentation de la tension artérielle suite à un stimulus sous-lésionnel), dont les conséquences peuvent être dramatiques.

La connaissance et la gestion de ces symptômes sont primordiales car leur impact sur la qualité de vie et la prise en charge rééducative de ces patients est majeur. Actuellement, le réentraînement cardiovasculaire des patients blessés médullaires en phase chronique passe par des séances de verticalisation progressive sur table. A notre connaissance, l'impact de la rééducation en exosquelette sur l'adaptation cardiovasculaire n'a pas été beaucoup étudié dans la littérature.

4. Objectif de l'étude

L'objectif général de ce travail était d'observer l'adaptation et la tolérance cardiovasculaire de patients présentant une paraplégie lors de l'effort de marche en exosquelette.

Notre hypothèse de travail était que l'adaptation cardiovasculaire lors de la marche en exosquelette était meilleure que lors de la verticalisation sur table.

MATERIEL ET METHODE

1. Patients

L'étude s'est déroulée entre juin 2021 et juin 2022. La participation à l'étude a été proposée aux patients blessés médullaires du centre de rééducation Jacques Calvé à Berck-sur-mer présentant les caractéristiques suivantes :

- **Critères d'inclusion** : âge supérieur à 18 ans, hospitalisation dans le service de blessés médullaires du centre, blessure médullaire responsable d'une paraplégie complète ou incomplète chronique (plus de 4 mois d'évolution), n'avoir jamais essayé l'exosquelette, ne pas présenter de contre-indication à l'utilisation de l'exosquelette.
- **Critères de non inclusion** : contre-indications à l'effort et à la verticalisation, contre-indications liées à l'utilisation de l'exosquelette, et le refus du patient d'utiliser l'exosquelette.

Pour pouvoir utiliser l'exosquelette en rééducation de routine, les patients admis dans le centre doivent avoir une densité minérale osseuse suffisante au niveau du fémur distal ($> 0,60 \text{ g/cm}^2$), mesurée par ostéodensitométrie. Ils ne doivent pas présenter de spasticité majeure des membres inférieurs, ni d'escarre non cicatrisée au niveau des zones de contact avec l'exosquelette.

La participation des patients à l'étude n'a fait l'objet d'aucune rémunération.

Les patients ont reçu une information orale claire et adaptée, et leur consentement oral et écrit a été obtenu au préalable.

2. Exosquelette

L'exosquelette utilisé au centre Jacques Calvé est l'exosquelette autoéquilibré Atalante de Wandercraft.

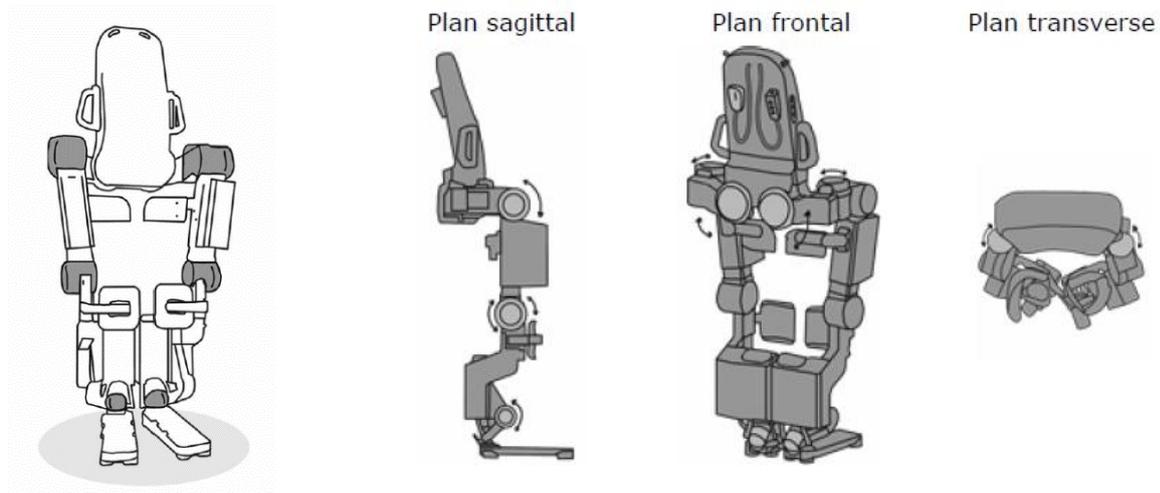
D'après la description du fabricant, il s'agit d'un système « destiné à effectuer des fonctions ambulatoires, des exercices de mobilité et des exercices physiques adaptés, mains libres, chez des patients présentant une déficience motrice des membres inférieurs et du tronc. » (23).

L'exosquelette Atalante est composé de deux membres inférieurs robotiques comprenant chacun 6 articulations (Figure 1). Les fixations sur le patient sont réalisées au niveau des cuisses, des jambes et des pieds. Le patient est également maintenu par un gilet et une ceinture abdominale.

Les fonctions de déambulation sont effectuées sans aide technique, sous contrôle d'un thérapeute formé. Deux modes de marche sont préprogrammés : marche dite « à petits pas » (vitesse lente 0,15 m/s) et marche dite « à grands pas » (vitesse plus rapide 0,39 m/s).

Les différents modes de fonctionnement sont choisis via une télécommande, utilisée par le thérapeute ou par le patient. Un capteur placé dans le dos du patient permet le déclenchement du robot par détection des mouvements du buste.

Figure 1 : schéma représentant l'exosquelette Atalante de Wandercraft (d'après la notice d'utilisation du fabricant)



En *Annexe 4*, une image 3D et l'arbre cinématique de l'exosquelette Atalante sont représentés.

3. Protocole de l'étude

Le protocole détaillé se trouve en *Annexe 5*.

Chaque patient a été suivi pendant une séance de verticalisation sur table et une séance de marche en exosquelette programmées le même jour.

Pendant les séances, la tension artérielle (TA) et la fréquence cardiaque (FC) ont été mesurées.

- La TA était mesurée par un brassard pneumatique et un tensiomètre électronique hospitalier ;
- Le relevé de la FC était réalisé via un saturomètre digital.

Les patients ont poursuivi leur prise en charge rééducative de routine selon le protocole du centre de rééducation. Ce protocole comportait des séances de kinésithérapie quotidiennes, dont 2 séances d'exosquelette par semaine.

Après 3 semaines de rééducation, une deuxième session de verticalisation et de marche en exosquelette a été réalisée pour chaque patient.

3.1 Verticalisation sur table

Une fois le patient installé sur la table de verticalisation, une première épreuve de **tilt lent** était réalisée. L'épreuve comportait au total 5 paliers d'inclinaison : 0°, 20°, 40°, 60° et 80°. A chaque palier, 3 prises de mesures (TA + FC) étaient réalisées à 1 minute d'intervalle.

Après 3 minutes de repos, une épreuve de **tilt rapide** était réalisée. Cette épreuve comportait seulement deux paliers d'inclinaison, à 0° et 80°. Trois prises de mesures (TA + FC) étaient réalisées à chaque palier, à 1 minute d'intervalle. Le passage de 0° à 80° durait entre 22 et 25 secondes.

3.2 Verticalisation en exosquelette

Une fois les patients installés dans l'exosquelette, 3 prises de mesures (TA + FC) étaient réalisées à 1 minute d'intervalle en **position debout statique**.

Les patients réalisaient ensuite deux épreuves de marche sur une distance de 10 mètres, avec l'aide d'un thérapeute : une épreuve à **vitesse lente** (marche à « petits pas ») et une épreuve à **vitesse rapide** (marche à « grands pas »). Immédiatement

après l'effort de marche, une prise de mesure (TA + FC) était réalisée. Un repos de 5 minutes en position assise séparait les 2 épreuves.

4. Analyse des données

Les variations de TA systolique (TAS), TA diastolique (TAD) et de FC ont été calculées pour toutes les épreuves :

- Pour les épreuves de tilt, entre les paliers 0° et 80°
- Pour l'exosquelette, entre la minute 0 et la minute 2.

Une comparaison des valeurs recueillies a été faite entre :

- L'épreuve de marche et les valeurs statiques
- La marche lente et la marche rapide
- La 1^{ère} session et la 2^{ème} session (3 semaines plus tard)

Les valeurs ont été exprimées en différence de millimètres de mercure (mmHg) pour la TA, en différence de battements par minute (bpm) pour la FC, ainsi qu'en pourcentages.

RESULTATS

1. Patients

Quatre patients ont été inclus dans l'étude. Aucun patient n'a refusé de participer à l'étude. Le *Tableau 1* résume leurs caractéristiques principales.

Les patients étaient tous de sexe masculin, d'une médiane d'âge de 50 ans +/- 23 ans. Tous les patients étaient des blessés médullaires de cause traumatique, dont le niveau lésionnel était situé entre T3 et L1. Deux patients présentaient une lésion complète (AIS A), deux autres une lésion incomplète (AIS D).

Trois patients sur les quatre portaient des bas de contention lors de la 1^{ère} session ; un seul patient en portait lors de la 2^{ème} session. Tous les patients prenaient leur traitement médicamenteux habituel. Ce traitement n'a pas été modifié entre les deux sessions d'enregistrement.

Tableau 1 : caractéristiques principales des patients inclus dans l'étude

Patient	Sexe	Age (en années)	Niveau lésionnel	AIS	Etiologie	Délai depuis la lésion médullaire
N°1	Homme	65	L1	D	Traumatique	4 mois (Juin 2021)
N°2	Homme	54	T5	A	Traumatique	16 mois (Juin 2020)
N°3	Homme	73	T12	D	Traumatique	9 mois (Février 2021)
N°4	Homme	27	T3	A	Traumatique	5 mois (Novembre 2021)

2. Verticalisation sur table

Les résultats complets sont présentés dans le tableau en *Annexe 6*.

Lors de l'épreuve de tilt lent, on observe une chute de la TAS (de -4 à -34 mmHg) chez les quatre patients, et une chute de la TAD chez trois d'entre eux, plus modérée (de -1 à -19 mmHg). Tous présentent une tachycardie réactionnelle (de +4 à +52 bpm), proportionnelle à la chute de TAS.

Pendant l'épreuve de tilt rapide, trois hommes présentent des variations cardiovasculaires globalement similaires au tilt lent (patients 1, 2, et 4). Un homme (patient 3) présente une augmentation des chiffres tensionnels avec tachycardie moindre.

Aucun patient n'a présenté de symptômes de mauvaise tolérance à la verticalisation lors des épreuves de tilt lent et de tilt rapide. La réponse cardiaque est globalement adaptée et proportionnelle à la chute tensionnelle chez les quatre patients, avec une tachycardie plus marquée chez les patients 3 et 4. La régulation cardiaque semble meilleure en tilt rapide, avec une chute tensionnelle moindre.

3. Verticalisation en exosquelette

Les résultats complets sont présentés dans le tableau en *Annexe 7*.

Lors de l'épreuve d'orthostatisme statique, trois patients (1, 3 et 4) présentent une baisse de la TAS et TAD (de -7 à -22 mmHg, et de -1 à -21 mmHg, respectivement). Un seul homme (patient 2) présente une légère augmentation de la

FC (+1 bpm), les trois autres présentent une baisse de la FC (de -2 à -8 bpm).

Lors de l'épreuve de marche en exosquelette, deux hommes améliorent leurs paramètres cardiovasculaires de TA et de FC (patients 1 et 4). Un homme (patient 3) améliore sa TAD et sa FC mais diminue sa TAS (-4 mmHg). Un homme (patient 2) diminue TAS et TAD et n'augmente que légèrement sa FC (+1 bpm). Il est à noter que ce patient présentait des chiffres tensionnels élevés en début d'épreuve (172/95mmHg).

Le tableau en *Annexe 8* compare les variations de TA et de FC après les épreuves de marche lente et rapide.

Trois hommes (patients 1, 2 et 3) présentent une augmentation de la TAS (de +4 à +13 mmHg) et une diminution de la TAD (de -5 à -17 mmHg). Un homme (patient 4) présente une diminution de la TAS et TAD (-5 et -21 mmHg, respectivement). La FC est globalement identique chez deux hommes (patient 1 et 2) et diminue chez deux autres (patients 3 et 4).

Lors des épreuves en exosquelette, aucun patient n'a présenté de symptômes de mauvaise tolérance à l'orthostatisme ou à l'effort de marche.

La régulation cardiaque semble meilleure chez trois patients lors de l'effort de marche plutôt qu'en position statique. Un patient (patient 2) présente une chute tensionnelle faiblement compensée par une variation de FC lors de l'effort de marche.

Les chiffres tensionnels sont globalement similaires quel que soit le mode de marche chez trois patients.

4. Variations des paramètres après 3 semaines de rééducation

Les résultats complets sont présentés dans les tableaux en *Annexe 9* et *Annexe 10*.

4.1 Verticalisation sur table

Par comparaison avec la session 1, on observe des variations cardiovasculaires qualitativement superposables pour chacun des patients. Sur le plan quantitatif, les baisses de TAS et TAD sont globalement plus importantes.

4.2 Verticalisation en exosquelette

Par comparaison avec la session 1, à vitesse lente, on observe des variations cardiovasculaires qualitativement superposables pour chacun des patients. Sur le plan quantitatif, les baisses de TAS et TAD sont moindres chez trois hommes, plus importantes chez l'un (patient 3).

Aucun patient n'a présenté de symptômes de mauvaise tolérance à la verticalisation ou à l'effort de marche pendant les épreuves.

5. Comparaison selon la sévérité de la lésion médullaire

En épreuve d'orthostatisme statique, les baisses de TAS et TAD sont plus importantes pour les patients présentant une lésion incomplète (1 et 3) en comparaison à ceux présentant une lésion complète (2 et 4).

A la marche, les deux patients avec lésion incomplète et un avec lésion complète (patient 4) présentent une augmentation de la TAS et/ou de la TAD. Seul un patient avec lésion complète (patient 2) présente une baisse de la TAS et TAD.

DISCUSSION

1. Principaux résultats

Les principaux résultats de notre étude sont les suivants :

- La verticalisation sur table retrouve une régulation cardiovasculaire altérée chez nos 4 patients, plus marquée en tilt lent qu'en tilt rapide
- Lors de l'orthostatisme en exosquelette, 3 patients sur 4 présentent une régulation cardiovasculaire altérée
- Lors de la marche en exosquelette, l'adaptation cardiovasculaire est meilleure qu'en position statique, chez 3 patients sur 4
- Les variations sont qualitativement similaires après 3 semaines de rééducation
- Les patients présentant une lésion médullaire incomplète ont une meilleure régulation cardiovasculaire lors de l'effort de marche que les patients présentant une lésion médullaire complète (à l'exception du patient 4)

2. L'orthostatisme

2.1 Physiologie

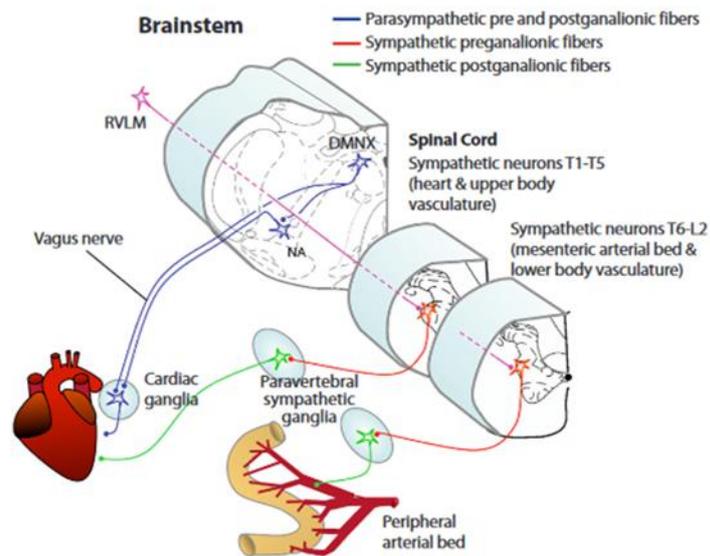
Le cœur possède une double innervation autonome (Figure 2) :

- sympathique (issue de la moelle thoracique entre T1 et T5)
- parasympathique (médiée par le nerf vague X)

Les vaisseaux ne possèdent qu'une innervation sympathique, provenant des

segments médullaires T1-T5 pour les membres supérieurs, et T6-L2 pour la vascularisation splanchnique et des membres inférieurs (24).

Figure 2 : schéma de l'innervation autonome du système cardiovasculaire



RVLM : moelle ventrolatérale supérieure

DMNX : nerf vague moteur dorsal

NA : noyau ambigu

(d'après Wecht et al. International Standards to document Autonomic Function following SCI (ISAFSCI): Second Edition, 2021)

La régulation de la TA et de la FC passe par le phénomène de baroréflexe. L'objectif de ce réflexe est de maintenir un flux sanguin suffisant au niveau cérébral. Pour cela, des récepteurs sensibles à l'étirement, situés dans les parois des artères carotidiennes et de l'aorte, vont capter les variations de TA.

Lors du passage de la position allongée à la position assise (ou assise à debout), la chute tensionnelle provoquée par le changement de position active les

barorécepteurs. En quelques secondes, ces derniers libèrent une cascade de mécanismes autonomes, hormonaux et mécaniques d'ajustement. La diminution du tonus vagal et la libération de l'activité sympathique conduisent à une vasoconstriction périphérique augmentant le retour veineux et à une augmentation de la FC, permettant ainsi le maintien de la TA (25,26).

2.2 Chez le blessé médullaire

Chez le patient blessé médullaire, la réponse à l'orthostatisme dépend du niveau et de la sévérité de la lésion (20).

Chez les patients dont la lésion se situe sous le niveau T6, des réponses cardiovasculaires similaires à celles des sujets sains ont été observées lors des épreuves de tilt (21,27).

Chez les patients présentant une lésion médullaire au-dessus du niveau T6, l'interruption du contrôle sympathique et la prédominance du système parasympathique vagal expliquent la fréquence des hypotensions orthostatiques, qui peuvent être sévères et aller jusqu'à la syncope.

En plus de la dysfonction du baroréflexe (28), la fréquence des hypotensions orthostatiques chez les patients blessés médullaires est expliquée par d'autres mécanismes tels que la diminution de la masse musculaire des membres inférieurs et l'altération du retour veineux (29).

Pour pallier à ces hypotensions orthostatiques, différents moyens existent : des

moyens physiques (bas de contention, ceinture abdominale, stimulation électrique fonctionnelle, exercice physique...) ou des moyens pharmacologiques (Midodrine, ...). L'impact de la rééducation en exosquelette sur les hypotensions orthostatiques n'a pas encore été réellement exploré (29).

Dans notre étude, aucun patient n'a présenté d'hypotension orthostatique sévère sur table ou en exosquelette. Tous présentaient une adaptation cardiovasculaire altérée.

Les réponses cardiovasculaires observées lors des épreuves de tilt et debout en exosquelette sont cohérentes avec celles observées dans la littérature. Soulignons que dans notre étude, les patients présentant une lésion complète étaient également ceux présentant une paraplégie dite « haute » (niveau supérieur à T6) et ceux présentant une lésion incomplète présentaient une paraplégie « basse » (niveau inférieur à T6).

Ainsi, les deux patients présentant une lésion complète au-dessus de T6 ont montré une régulation cardiovasculaire altérée plus franche que les patients présentant une lésion basse incomplète lors de la verticalisation sur table.

En position debout statique dans l'exosquelette, un des deux patients présentant une lésion complète montre une faible variation cardiovasculaire.

3. La marche

3.1 Physiologie

La marche physiologique repose sur l'action coordonnée des muscles et

articulations des membres inférieurs afin de permettre le déplacement du corps, avec une consommation d'énergie minimale. Les atteintes orthopédiques et neurologiques perturbent cet équilibre et augmentent le coût métabolique de la marche.

La dépense énergétique et les variations cardiovasculaires observées lors de la marche du sujet sain dépendent de la vitesse de marche. La consommation maximale d'oxygène (VO_2 max) et la FC augmentent proportionnellement à l'effort fourni. La TA peut également augmenter de façon modérée lors de l'effort.

3.2 Chez le blessé médullaire

La restauration de la marche est un des objectifs de rééducation le plus fréquemment exprimé par les patients (30).

Avec l'avancée technologique, des systèmes d'assistance robotisée à la marche ont vu le jour. Les premiers systèmes robotisés passifs ont progressivement laissé la place aux exosquelettes actifs. Si les premiers modèles étaient pensés pour une marche sur tapis roulant (LOKOMAT® de Medimex par exemple), les modèles plus récents permettent aux patients une déambulation sur terrain neutre.

Une revue de la littérature publiée en 2015 a souligné l'efficacité des exosquelettes motorisés en neuro-rééducation (31). Ces systèmes, d'utilisation relativement facile pour les patients et sécurisée, ouvrent de nouvelles perspectives rééducatives. L'indépendance qu'ils octroient aux patients laisse envisager une transposition de leur utilisation en milieu écologique.

Parmi les plus cités dans la littérature, l'exosquelette ReWalk a fait les preuves de son efficacité et de sa sécurité d'utilisation (11,32). Il présente cependant des limites : peu de degrés de liberté dans le réglage (uniquement les articulations de la hanche et du genou), l'absence d'auto-équilibrage et la nécessité d'utiliser des aides techniques de marche (cannes anglaises).

Plus récemment encore, se sont développés les exosquelettes auto-équilibrés tel qu'Atalante (WanderCraft). Une étude réalisée chez des patients paraplégiques complets a montré sa sécurité d'utilisation et le bénéfice sur la rééducation à la marche (33). A l'issue des 12 séances de rééducation de l'étude, 7 patients sur les 11 inclus étaient capables de marcher sur 10 mètres sans aides techniques ni assistance d'un thérapeute. Une augmentation significative de la FC entre la 6^{ème} et la 12^{ème} séance de rééducation a également été mise en évidence, soulignant l'intérêt de cet exosquelette dans la rééducation cardiovasculaire à l'effort.

En effet, les séances de marche en exosquelette représentent un réel effort physique pour les patients.

Dans une étude utilisant l'exosquelette ReWalk, une augmentation de la consommation d'oxygène (VO_2) a été montrée au cours de l'effort de marche, comparativement à la VO_2 en position assise et debout. Le coût énergétique était évalué à 3.3 METs (Metabolic Equivalent of Task), soit 24-35 % de la VO_2 max. Une augmentation de la FC a par ailleurs été montrée, représentant environ 50 % de la FC max. L'utilisation de l'exosquelette correspondrait donc à un effort physique modéré (34). Cet effort physique s'expliquait en partie par l'utilisation de cannes anglaises lors

de la marche.

Dans l'exosquelette Atalante, l'absence d'aide technique à la marche oblige le patient blessé médullaire à sans cesse ajuster son tonus du tronc, occasionnant l'effort physique. Aucune étude n'a encore réellement quantifié cette dépense énergétique.

Il a été montré qu'une activité physique d'une intensité de 3.3 METs, pendant 1 heure, 3 jours par semaine serait associée à une réduction du risque cardiovasculaire dans la population générale. D'après Miller et al., ces chiffres sont transposables aux patients blessés médullaires (35). Ainsi, les exosquelettes représenteraient un système intéressant d'entraînement à l'effort. L'intensité physique nécessaire à leur utilisation serait d'ailleurs compatible avec une utilisation prolongée (1 heure voire plus).

Dans notre étude, les patients ont montré une adaptation cardiovasculaire lors de la marche en exosquelette meilleure qu'en orthostatisme statique. Seul un patient (patient 2) a présenté un moins bon contrôle de sa TA à la marche (chute de 20 mmHg de TAS), mais il présentait des chiffres de TA de repos élevés (172/95 mmHg) ; sa TA après l'effort de marche restait finalement tout à fait correcte (152/88 mmHg).

Peu d'études ont étudié la TA des patients lors de l'effort de marche en exosquelette. Dans leur étude, Zeilig et al. ont montré des variations de TA et de FC après l'utilisation de l'exosquelette ReWalk compatibles avec la réalisation d'un effort physique (légère augmentation de la TA et tachycardie modérée) (32). Dans notre étude, tous les patients ont présenté une tachycardie modérée, compatible avec la réalisation d'un effort physique d'intensité modérée comme illustré dans la littérature.

4. Hypothèse de travail

Notre hypothèse de travail a été vérifiée. Chez nos quatre patients, l'orthostatisme est mieux supporté en dynamique. L'effort physique fourni lors de l'effort de marche en exosquelette entraîne un meilleur ajustement cardiovasculaire chez les patients paraplégiques, en comparaison à la verticalisation statique.

5. Limites de l'étude

Notre étude comporte plusieurs limites.

Il s'agit d'une étude observationnelle, monocentrique, étudiant un petit échantillon de patients. Des études complémentaires avec un meilleur niveau de preuve pourraient approfondir le sujet.

Par ailleurs, les paramètres cardiovasculaires n'ont pas pu être enregistrés en continu pendant l'effort. Un monitoring de la FC et de la TA pendant l'effort de marche en exosquelette serait intéressant pour observer les variations des paramètres au cours de l'effort.

6. Perspectives

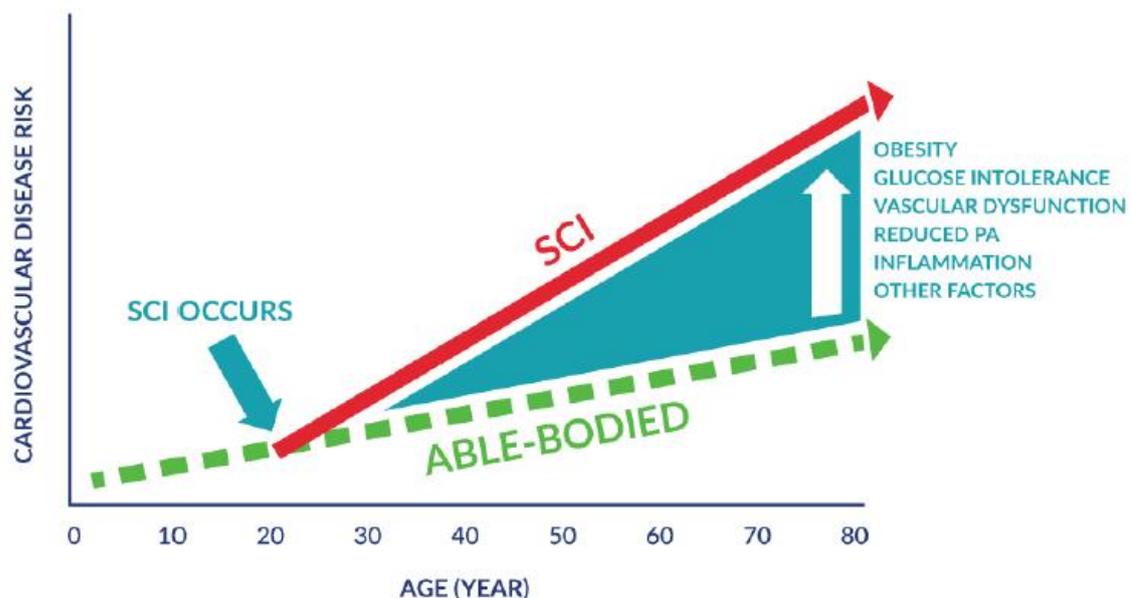
La prévention des maladies cardiovasculaires représente un enjeu de santé publique majeur chez les patients blessés médullaires, car elles restent une des principales causes de morbidité et de mortalité (36). La prévalence des maladies cardiovasculaires est nettement supérieure chez les blessés médullaires (30-50 %) que dans la population générale (5-10 %).

L'augmentation du risque cardiovasculaire chez le patient blessé médullaire

s'explique en partie par la perte du contrôle sympathique adrénurgique et par la diminution de l'activité physique inhérente à la perte de mobilité (*Figure 3*). Cette sédentarité est à l'origine de complications secondaires comme le syndrome métabolique ou l'obésité, plus fréquents chez le blessé médullaire (37).

Figure 3 : augmentation du risque cardiovasculaire chez les patients blessés médullaires (d'après Warburton et al., Cardiovascular Health and Exercise Following Spinal Cord Injury)

SCI : Spinal Cord Injury



Une revue de la littérature publiée en 2007 a mis en évidence l'intérêt des programmes d'entraînement adaptés aux patients blessés médullaires. Outre l'impact physique, l'impact sur la qualité de vie et le bien-être psychologique sont majeurs en permettant aux patients d'améliorer leur participation aux activités de vie quotidienne. Des programmes de réentraînement adaptés à chaque patient et au niveau lésionnel devraient être inclus dans les programmes de rééducation (38). Actuellement, l'activité physique après lésion médullaire comporte des exercices sur tapis roulant (en fauteuil

ou avec système de décharge du poids), des exercices d'ergomètre à bras, des exercices avec stimulation électrique fonctionnelle, et des exercices combinés (39–41).

Les exosquelettes sont un outil novateur de réentraînement. En plus des systèmes classiques de rééducation, ils apportent un moyen de suppléance de la fonction de marche sécurisée et occasionnant un effort physique supportable pour les patients blessés médullaires. Ils présentent d'autres intérêts non négligeables : maintien de la densité minérale osseuse, diminution de la spasticité, amélioration du transit intestinal... (11,35). Des patients ont également exprimé l'impact psychologique positif de se verticaliser et de se retrouver à hauteur de regard de leurs interlocuteurs (42). L'exosquelette Atalante, par la liberté de mouvement qu'il offre, ouvre encore de nouvelles perspectives, et des études complémentaires sur le réentraînement à l'effort des patients blessés médullaires sont nécessaires.

Même si l'utilisation écologique reste encore trop précoce et les coûts trop importants pour permettre aux patients de les acquérir (31), la rééducation en exosquelette devrait devenir partie intégrante de la prise en charge des patients blessés médullaires. Déjà utilisés chez les patients paraplégiques, leur utilisation pourrait s'ouvrir aux patients tétraplégiques (43).

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'observer l'adaptation cardiovasculaire des patients paraplégiques lors de l'effort de marche en exosquelette, en comparaison à la verticalisation sur table. L'orthostatisme est mieux supporté en dynamique qu'en statique chez les patients blessés médullaires. Les exosquelettes offrent un moyen de rééducation intéressant par plusieurs aspects, et leur utilisation devrait faire partie intégrante de la prise en charge de ces patients.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. World Health Organization. Spinal cord injury [Internet]. Disponible sur: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/spinal-cord-injury>
2. HAS. ald_20_guide_paraplegie__20_septembre_2007.pdf.
3. Rabinstein AA. Traumatic Spinal Cord Injury. 2018;16.
4. Regan MA, Teasell RW, Wolfe DL, Keast D, Mortenson WB, Aubut JAL. A Systematic Review of Therapeutic Interventions for Pressure Ulcers After Spinal Cord Injury. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. févr 2009;90(2):213-31.
5. Alm M, Saraste H, Norrbrink C. Shoulder pain in persons with thoracic spinal cord injury: Prevalence and characteristics. J Rehabil Med. 2008;40(4):277-83.
6. Suzuki K, Kawamura Y, Hayashi T, Sakurai T, Hasegawa Y, Sankai Y. Intention-Based Walking Support for Paraplegia Patient. In: 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics [Internet]. Waikoloa, HI, USA: IEEE; 2005. p. 2707-13. Disponible sur: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1571559/>
7. Dollar AM, Herr H. Lower Extremity Exoskeletons and Active Orthoses: Challenges and State-of-the-Art. IEEE Trans Robot. févr 2008;24(1):144-58.
8. Esquenazi A, Packel A. Robotic-Assisted Gait Training and Restoration. American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation. nov 2012;91(11):S217-31.
9. Dijkers MP, Akers KG, Dieffenbach S, Galen SS. Systematic Reviews of Clinical Benefits of Exoskeleton Use for Gait and Mobility in Neurologic Disorders: A Tertiary Study. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. févr 2021;102(2):300-13.
10. Mehrholz J, Thomas S, Werner C, Kugler J, Pohl M, Elsner B. Electromechanical-assisted training for walking after stroke. Cochrane Stroke

Group, éditeur. Cochrane Database of Systematic Reviews [Internet]. 10 mai 2017; Disponible sur: <https://doi.wiley.com/10.1002/14651858.CD006185.pub4>

11. Esquenazi A, Talaty M, Packel A, Saulino M. The ReWalk Powered Exoskeleton to Restore Ambulatory Function to Individuals with Thoracic-Level Motor-Complete Spinal Cord Injury. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*. nov 2012;91(11):911-21.
12. Yip CCH, Lam CY, Cheung KMC, Wong YW, Koljonen PA. Knowledge Gaps in Biophysical Changes After Powered Robotic Exoskeleton Walking by Individuals With Spinal Cord Injury—A Scoping Review. *Front Neurol*. 10 mars 2022;13:792295.
13. Brinkemper A, Grasmücke D, Yilmaz E, Reinecke F, Schildhauer TA, Aach M. Influence of Locomotion Therapy With the Wearable Cyborg HAL on Bladder and Bowel Function in Acute and Chronic SCI Patients. *Global Spine Journal*. 16 avr 2021;219256822110038.
14. Chun A, Asselin PK, Knezevic S, Kornfeld S, Bauman WA, Korsten MA, et al. Changes in bowel function following exoskeletal-assisted walking in persons with spinal cord injury: an observational pilot study. *Spinal Cord*. avr 2020;58(4):459-66.
15. Juszczak M, Gallo E, Bushnik T. 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*. sept 2018;24(4):336-42.
16. Krassioukov A, Biering-Sørensen F, Donovan W, Kennelly M, Kirshblum S, Krogh K, et al. International standards to document remaining autonomic function after spinal cord injury. *The Journal of Spinal Cord Medicine*. juill 2012;35(4):201-10.
17. Hou S, Rabchevsky AG. Autonomic Consequences of Spinal Cord Injury. *Comprehensive Physiology*. 2014;4:35.
18. Prévinaire JG, Mathias CJ, El Masri W, Soler JM, Leclercq V, Denys P. The isolated sympathetic spinal cord: Cardiovascular and sudomotor assessment in

spinal cord injury patients: A literature survey. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. oct 2010;53(8):520-32.

19. Previnaire JG, Soler JM, Leclercq V, Denys P. Severity of autonomic dysfunction in patients with complete spinal cord injury. *Clin Auton Res*. févr 2012;22(1):9-15.
20. Bluvshstein V, Korczyn AD, Akselrod S, Pinhas I, Gelernter I, Catz A. Hemodynamic responses to head-up tilt after spinal cord injury support a role for the mid-thoracic spinal cord in cardiovascular regulation. *Spinal Cord*. févr 2011;49(2):251-6.
21. Houtman S, Oeseburg B, Hughson RL, Hopman MTE. Sympathetic nervous system activity and cardiovascular homeostasis during head-up tilt in patients with spinal cord injuries. *Clinical Autonomic Research*. août 2000;10(4):207-12.
22. Jegede AB, Rosado-Rivera D, Bauman WA, Cardozo CP, Sano M, Moyer JM, et al. Cognitive performance in hypotensive persons with spinal cord injury. *Clin Auton Res*. févr 2010;20(1):3-9.
23. Atalante X | Une rééducation d'un nouveau genre [Internet]. Disponible sur: <https://www.wandercraft.eu/pour-la-reeducation>
24. Wecht JM, Krassioukov AV, Alexander M, Handrakis JP, McKenna SL, Kennelly M, et al. International Standards to document Autonomic Function following SCI (ISAFSCI): Second Edition. *Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation*. 24 mai 2021;27(2):23-49.
25. Lanfranchi PA, Somers VK. Arterial baroreflex function and cardiovascular variability: interactions and implications. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 1 oct 2002;283(4):R815-26.
26. Blackmer J. Orthostatic Hypotension in Spinal Cord Injured Patients. *The Journal of Spinal Cord Medicine*. janv 1997;20(2):212-7.

27. Wecht JM, De Meersman RE, Weir JP, Spungen AM, Bauman WA. Cardiac autonomic responses to progressive head-up tilt in individuals with paraplegia. *Clin Auton Res.* déc 2003;13(6):433-8.
28. Aslan SC, Randall DC, Donohue KD, Knapp CF, Patwardhan AR, McDowell SM, et al. Blood pressure regulation in neurally intact human vs. acutely injured paraplegic and tetraplegic patients during passive tilt. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology.* mars 2007;292(3):R1146-57.
29. Wecht JM, Bauman WA. Implication of altered autonomic control for orthostatic tolerance in SCI. *Autonomic Neuroscience.* janv 2018;209:51-8.
30. Ditunno P, Patrick M, Stineman M, Ditunno J. Who wants to walk? Preferences for recovery after SCI: a longitudinal and cross-sectional study. *Spinal Cord.* :7.
31. Federici S, Meloni F, Bracalenti M, De Filippis ML. The effectiveness of powered, active lower limb exoskeletons in neurorehabilitation: A systematic review. Scherer MJ, Federici S, éditeurs. *NRE.* 2 nov 2015;37(3):321-40.
32. Zeilig G, Weingarden H, Zwecker M, Dudkiewicz I, Bloch A, Esquenazi A. Safety and tolerance of the ReWalk™ exoskeleton suit for ambulation by people with complete spinal cord injury: A pilot study. *The Journal of Spinal Cord Medicine.* mars 2012;35(2):96-101.
33. Kerdraon J, Previnaire JG, Tucker M, Coignard P, Allegre W, Knappen E, et al. Evaluation of safety and performance of the self balancing walking system Atalante in patients with complete motor spinal cord injury. *Spinal Cord Ser Cases.* déc 2021;7(1):71.
34. Asselin P, Knezevic S, Kornfeld S, Cirnigliaro C, Agranova-Breyter I, Bauman WA, et al. Heart rate and oxygen demand of powered exoskeleton-assisted walking in persons with paraplegia. *J Rehabil Res Dev.* 2015;52(2):147-58.

35. Miller L, Zimmermann A, Herbert W. Clinical effectiveness and safety of powered exoskeleton-assisted walking in patients with spinal cord injury: systematic review with meta-analysis. *MDER*. mars 2016;455.
36. Myers J, Lee M, Kiratli J. Cardiovascular Disease in Spinal Cord Injury: An Overview of Prevalence, Risk, Evaluation, and Management. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*. févr 2007;86(2):142-52.
37. Warburton DE, Krassioukov A, Sproule S, Eng JJ. Cardiovascular Health and Exercise Following Spinal Cord Injury. :71.
38. Devillard X, Rimaud D, Roche F, Calmels P. Effects of training programs for spinal cord injury. *Ann Readapt Med Phys*. juill 2007;50(6):490-8, 480-9.
39. Davis GM, Shephard RJ. Cardiorespiratory fitness in highly active versus inactive paraplegics. *Med Sci Sports Exerc*. oct 1988;20(5):463-8.
40. Figoni SF. Perspectives on cardiovascular fitness and SCI. *J Am Paraplegia Soc*. oct 1990;13(4):63-71.
41. Jeffries EC, Hoffman SM, de Leon R, Dominguez JF, Semerjian TZ, Melgar IA, et al. Energy expenditure and heart rate responses to increased loading in individuals with motor complete spinal cord injury performing body weight-supported exercises. *Arch Phys Med Rehabil*. août 2015;96(8):1467-73.
42. Kinnett-Hopkins D, Mummidisetty CK, Ehrlich-Jones L, Crown D, Bond RA, Applebaum MH, et al. Users with spinal cord injury experience of robotic Locomotor exoskeletons: a qualitative study of the benefits, limitations, and recommendations. *J NeuroEngineering Rehabil*. déc 2020;17(1):124.
43. Rodriguez Tapia G, Doumas I, Lejeune T, Previnaire JG. Wearable powered exoskeletons for gait training in tetraplegia: a systematic review on feasibility, safety and potential health benefits. *Acta Neurol Belg*. oct 2022;122(5):1149-62.
44. Traumatic Spinal Cord Injury Facts and Figures at a Glance. :2.

45. Conti A, Campagna S, Gianino MM, Mamo C, Onorati R, Albanesi B, et al. Incidence and mortality of spinal cord injury from 2008 to 2020: a retrospective population-based cohort study in the Piedmont Region, Italy. *Spinal Cord* [Internet]. 6 août 2022; Disponible sur: <https://www.nature.com/articles/s41393-022-00842-6>
46. Huynh V, Burger G, Dang QV, Pelgé R, Boéris G, Grizzle JW, et al. Versatile Dynamic Motion Generation Framework: Demonstration With a Crutch-Less Exoskeleton on Real-Life Obstacles at the Cybathlon 2020 With a Complete Paraplegic Person. *Front Robot AI*. 24 sept 2021;8:723780.

ANNEXES

Annexe 1 : Score AIS (Asia Impairment Scale) (version française)

Date de l'examen _____ Heure de l'examen _____
 Nom de l'examinateur _____ Signature _____
 Nom de l'examinateur _____ Signature _____
 PT Chirurgien rachidien Physiatre Infirmière Autre (spécifiez): _____

DROITE

MUSCLES-CLÉS MOTEUR

SENSITIF POINTS SENSITIFS-CLÉS
 Toucher Léger (TL) | Piqûre (P)

MSD (Membre Supérieur Droit)

C2
C3
C4

C5 Fléchisseurs du coude
C6 Extenseurs du poignet
C7 Extenseurs du coude
C8 Fléchisseurs des doigts
T1 Abducteurs des doigts (peut oag)

T2
T3
T4
T5
T6
T7
T8
T9
T10
T11
T12
L1

MID (Membre Inférieur Droit)

L2 Fléchisseurs de la hanche
L3 Extenseurs du genou
L4 Dorsifléchisseurs de la cheville
L5 Extenseurs du gros orteil
S1 Fléchisseurs plantaires de la cheville

S2
S3
S4-5

TOTAUX DROIT (MAXIMUM)

(50) (56) (56)

• Points sensitifs-clés

GAUCHE

MUSCLES-CLÉS MOTEUR

MSG (Membre Supérieur Gauche)

C2
C3
C4

C5 Fléchisseurs du coude
C6 Extenseurs du poignet
C7 Extenseurs du coude
C8 Fléchisseurs des doigts
T1 Abducteurs des doigts (peut oag)

T2
T3
T4
T5
T6
T7
T8
T9

MIG (Membre Inférieur Gauche)

L2 Fléchisseurs de la hanche
L3 Extenseurs du genou
L4 Dorsifléchisseurs de la cheville
L5 Extenseurs du gros orteil
S1 Fléchisseurs plantaires de la cheville

S2
S3
S4-5

TOTAUX GAUCHE (MAXIMUM)

(50) (56) (56)

SOUS-TOTAUX MOTEURS MSD + MSG = FMMS TOTAL (50) MID + MIG = FMMI TOTAL (50) MAX (25) (25) (50)

SOUS-TOTAUX SENSITIFS TLD + TLG = TL TOTAL (56) PD + PG = P TOTAL (112) MAX (56) (56) (112)

RBC: Présent Absent Inconnu Syndrome de la queue de cheval: Oui Non Inconnu Besoin d'aide? Outil de classification informatisé disponible à: www.isnscs.org/algorithm.com

NIVEAU NEUROLOGIQUES 1. SENSITIF D G 3. NIVEAU NEUROLOGIQUE DE LA LÉSION (NLL) 4. COMPLÈTE OU INCOMPLÈTE? (Pour les lésions avec absence de fonction motrice ou sensitive au niveau S4-5 seulement)

Échelles 1-4 pour la classification au verso 2. MOTEUR 5. ÉCHELLE DE SÉVÉRITÉ ASIA (AIS) 6. ZONE DE PRÉSERVATION PARTIELLE SENSITIVE D G MOTRICE

Le formulaire a été modifié à partir de la feuille de travail ISNCSCI version REV 04/19 avec la permission de l'American Spinal Injury Association. FBI Version: 12/19-06-07

ASIA
 CLASSIFICATION INTERNATIONALE POUR LA
 NORMES INTERNATIONALES POUR LA
 CLASSIFICATION DES LÉSIONS MÉDULLAIRES
 (ISNCSCI)
ISNCSCI

Évaluation de la fonction motrice

- 0 = Paralyse totale
 - 1 = Contraction visible ou palpable
 - 2 = Mouvement actif, pleine amplitude sans gravité
 - 3 = Mouvement actif, pleine amplitude, contre gravité
 - 4 = Mouvement actif, pleine amplitude contre gravité et résistance modérée dans une position musculaire spécifique.
 - 5 = Mouvement actif (normal), pleine amplitude contre gravité et pleine résistance dans une position musculaire fonctionnelle attendue d'un individu sans déficit.
- NE = Non évaluable (i.e. en raison d'une immobilisation, de douleur intense limitant l'évaluation, une amputation d'un membre ou une contracture >50 % de l'amplitude normale).
- 0*, 1*, 2*, 3*, 4*, NE* = Condition autre que médullaire

Évaluation de la fonction sensitive

- 0 = Absente
- 1 = Altérée, sensation soit diminuée/altérée/soit hypersensibilité
- 2 = Normale
- NE = Non évaluable
- 0*, 1*, NE* = Condition autre que médullaire

Note: Les scores moteurs et sensitifs anormaux doivent être identifiés par un * pour indiquer que le déficit est due à une condition autre que médullaire. La condition autre doit être expliquée dans la zone Commentaires, ainsi que des informations sur la manière dont la mesure est déterminé pour les besoins de classification (au moins normal ou anormal pour la classification)

Quand évaluer les muscles non-clés

Pour un patient ayant une classification apparente AIS B, la fonction des muscles non-clés doit être testée sur plus de 3 niveaux sous le niveau moteur de chaque côté pour classer la lésion de façon plus précise (différencier les AIS B et C).

Mouvement	Racine
Épaule: Flexion, extension, abduction, adduction, rotation interne et externe. Coude: Supination.	C5
Coude: Pronation Poignet: Flexion	C6
Doulot: Flexion à l'articulation proximale, extension. Pouce: Flexion, extension et abduction du pouce.	C7
Doulot: Flexion à l'articulation MCP. Pouce: Opposition, adduction et abduction perpendiculaire à la paume.	C8
Doulot: Abduction de l'index.	T1
Hanche: Adduction.	L2
Hanche: Rotation externe.	L3
Hanche: Extension, abduction, rotation interne. Genou: Flexion.	L4
Cheville: Inversion et éversion. Orteil: Extension des articulations MTP et IP.	L5
Hallux et orteil: Flexion et abduction articulations IPP et IPD.	L5
Hallux: Adduction.	S1

Échelle de sévérité ASIA (AIS)

A = Complète. Aucune fonction sensitive ou motrice préservée dans les segments S4-5.

B = Sensitive incomplète. La fonction sensitive est préservée sous le niveau neurologique, mais pas la fonction motrice, et inclut les segments sacrés S4-5 (toucher léger ou piqûre en S4-5 ou pression anale profonde) ET aucune fonction motrice n'est préservée à plus de trois niveaux sous le niveau moteur de chaque côté du corps.

C = Motrice incomplète. La fonction motrice est préservée aux segments sacrés les plus caudaux pour la contraction anale volontaire (CAV) OU le patient répond au critère pour le statut sensitif incomplet (fonction sensitive préservée aux segments sacrés les plus caudaux (S4-S5) pour le toucher léger, la piqûre et la pression anale profonde) et possède une préservation de la fonction motrice sur plus de trois niveaux sous le niveau moteur ipsilatéral de chaque côté du corps. (Ceci inclut la fonction des muscles clés et non-clés utilisée pour déterminer un statut moteur incomplet). Pour les AIS C, moins de la moitié des muscles clés sous le niveau neurologique à une cote musculaire > 3.

D = Motrice incomplète. La fonction motrice est préservée sous le niveau neurologique, et au moins la moitié (la moitié ou plus) des muscles-clés sous le NLL à une cotation > 3.

E = Normal. Si la fonction sensitive et motrice, testée à l'aide du ISNCSCI, est notée comme normale pour tous les segments alors que le patient avait des déficits antérieurs, le niveau de sévérité sur l'AIS est alors de E. Un individu sans LM initiale ne recevra pas de niveau de sévérité sur l'AIS.

Utiliser ND (Non Déterminé) pour documenter les niveaux sensitifs et moteurs, le niveau neurologique, l'échelle de sévérité ASIA et/ou la zone de préservation partielle lorsqu'ils ne peuvent être déterminés à l'aide des résultats de l'examen.

Étapes de la classification

L'ordre suivant est recommandé afin de déterminer la classification des individus ayant une LM.

1. Déterminer les niveaux sensitifs pour les côtés droit et gauche.
Le niveau sensitif est le dermatome intact le plus caudal pour les tests de piqûre et de toucher léger.
2. Déterminer les niveaux moteurs pour les côtés droit et gauche.
Tel que défini par le muscle-clé le plus bas ayant une cotation d'au moins 3 (en décubitus dorsal), pour autant que la fonction motrice des muscles-clés situés au-dessus de ce niveau soit jugée intacte (cotation de 5).
Note: dans les régions où il n'y a aucun myotome, le niveau moteur est présumé être le même que le niveau sensitif si la fonction motrice située au-dessus de ce niveau est normale.
3. Déterminer le niveau neurologique de la lésion (NLL)
Ceci fait référence au segment le plus caudal où les fonctions sensitives sont intactes et la force musculaire contre gravité est présente (3 ou plus), pour autant que les fonctions motrices et sensitives rostrales soient intactes. Le NLL est le plus céphalique des niveaux sensitifs et moteurs déterminés aux étapes 1 et 2.
4. Déterminer si la lésion est complète ou incomplète.
(i.e. absence ou présence de fonction ou niveau du segment sacré)
Si contraction anale volontaire = Non ET tous les scores sensitifs pour les niveaux S4-5 = 0
ET pression anale profonde = Non, alors la lésion est Complète.
Si non la lésion est Incomplète.
5. Déterminer le grade selon l'échelle de sévérité ASIA (AIS):
La lésion est-elle complète? Si OUI, AIS-A et la ZPP peut être enregistrée (dermatome ou myotome le plus bas sur chaque côté avec une certaine préservation)
NON
La lésion est-elle complète au niveau moteur? Si OUI, AIS-B (Non= contraction anale volontaire OU fonction motrice sur plus de trois niveaux sous le niveau moteur d'un côté spécifique et le patient a une lésion incomplète sensitive)
NON
Au moins la moitié (la moitié ou plus) des muscles-clés sous le niveau neurologique de la lésion ont une cotation plus grande ou égale à 3?
NON
OUI

Si la fonction sensitive et motrice est normale pour tous les segments, AIS - E
Note: AIS E est utilisé pour les évaluations effectuées lors des suivis lorsqu'un individu ayant une LM documentée retrouve des fonctions normales. Si aucun déficit n'est trouvé lors de l'évaluation initiale, l'individu est neurologiquement intact et l'échelle ASIA ne s'applique pas.

6. Déterminer la zone de préservation partielle.
La ZPP est utilisée uniquement pour les lésions avec absence de fonction motrice (CAV) OU sensitive (pas de PAD), pas de sensibilité TL et pas de sensibilité P dans les segments sacrés S4-5 les plus bas, et fait référence aux dermatomes et myotomes partiellement innervés sous les niveaux moteurs et sensitifs. Avec une préservation de la fonction sensitive sacrée, la ZPP sensitive n'est pas applicable et, "NA" est inscrit dans la case. Par conséquent, si CAV est présent, la ZPP motrice n'est pas applicable et est noté NA

Annexe 2 : tendances épidémiologiques récentes (44,45)

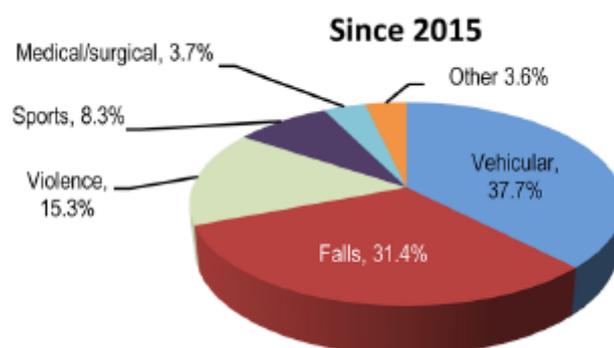
D'après le Centre National de Statistique de la Lésion Médullaire (NSCISC), l'incidence de la lésion médullaire aux Etats-Unis en 2021 est estimée à 54 cas par millions d'habitants, soit 18 000 nouveaux cas par an. Ils estiment que 253 000 à 378 000 personnes vivent avec une lésion médullaire dans leur pays.

Dans une étude rétrospective menée en Italie, Conti et al. ont mis en évidence une diminution des taux d'incidence et de mortalité entre 2008 et 2020.

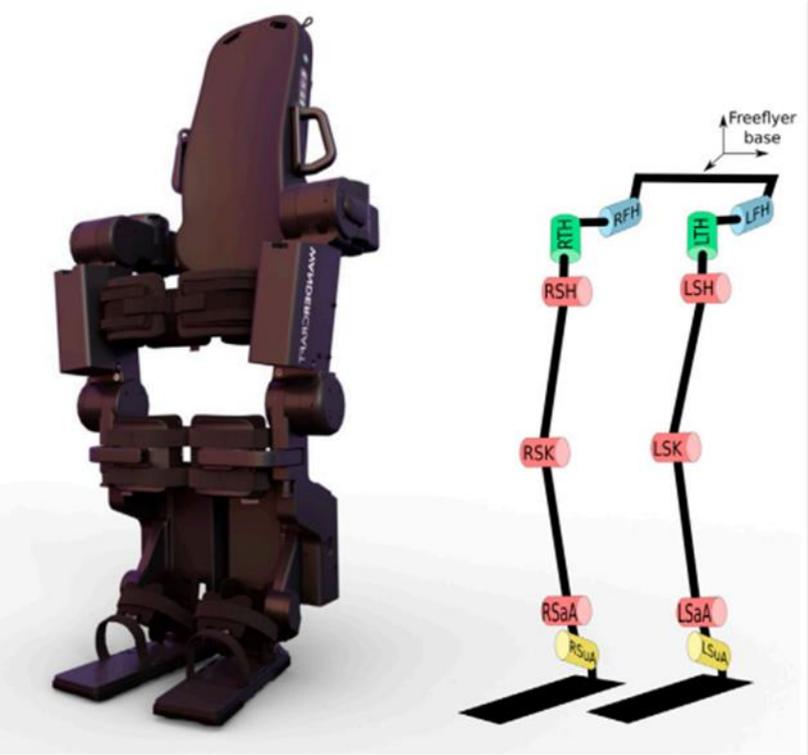
Entre les années 1970 et 2015, l'âge de survenue a augmenté de 29 à 43 ans. L'OMS décrit dorénavant deux tranches de population à risque : les hommes de moins de 30 ans et les sujets de plus de 70 ans.

Le sex ratio est de 78 % d'hommes depuis 2015.

L'étiologie principale reste l'accidentologie routière, suivie de près par les chutes.

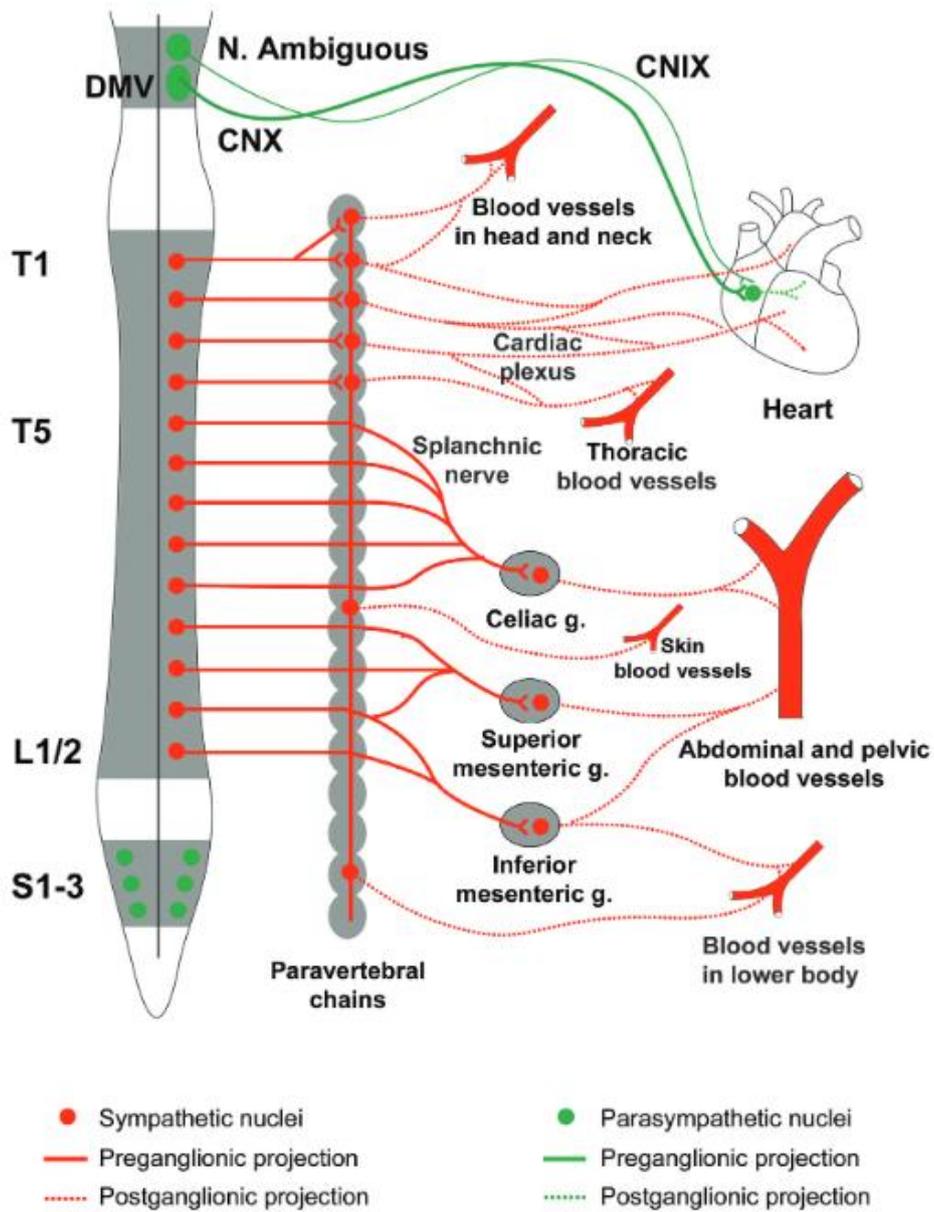


Annexe 3 : représentation 3D et arbre cinématique de l'exosquelette Atalante (d'après Huynh et al., dans *Frontiers in Robotics and AI*, 2021 (46))



Annexe 4 : anatomie du système nerveux autonome

(D'après Hou et Rabchevsky dans *Comprehensive Physiology*, 2014 (17))



Annexe 5 : protocole de l'étude

J1 : Epreuve orthostatisme statique (en salle de kinésithérapie neurologique)

- 1) Prise de mesure TA + FC au fauteuil
- 2) Installation du patient sur la table de verticalisation
- 3) Epreuve 1 : verticalisation progressive par paliers : 0° / 20° / 40° / 60° / 80°, soit 5 paliers
- 4) Retour à 0°, repos 3 minutes
- 5) Epreuve 2 : verticalisation continue : 0° et 80°, soit 2 paliers
- 6) Retour au fauteuil roulant

Chaque palier : 3 minutes (minute 0, minute 1, minute 2)

- TA : 3 mesures à 1 minute d'intervalle, brassard électronique
- Pouls : toutes les 5 secondes, saturomètre

Surveillance tolérance de la verticalisation (symptômes).

J2 : Epreuve orthostatique dans l'exosquelette (en salle Vector)

- 1) Installation du patient dans l'exosquelette
- 2) Epreuve 1 : Orthostatisme statique
 - Assis dans exosquelette (3 minutes)
 - Debout dans exosquelette (3 minutes)
- 3) Epreuve 2 : Marche
 - Marche à vitesse lente sur 10 mètres puis 1 prise de mesure après l'effort
 - Repos 3 minutes en position assise
 - Marche à vitesse rapide sur 10 mètres puis 1 prise de mesure après l'effort
- 4) Retour au fauteuil roulant
- 5) Vérification des points d'appuis cutanés dans le service d'hospitalisation

J3 : Epreuve orthostatique dans l'exosquelette après 3 semaines d'entraînement

Idem J1 et J2

Annexe 6 : tableau des variations de la TAS, de la TAD et de la FC lors des épreuves de tilt lent et de tilt rapide sur table de verticalisation

	TILT LENT															TILT RAPIDE								
	TAS (en mmHg)					TAD (en mmHg)					FC (en bpm)					TAS (en mmHg)		TAD (en mmHg)		FC (en bpm)				
	0°	20°	40°	60°	80°	0°	20°	40°	60°	80°	0°	20°	40°	60°	80°	0°	80°	0°	80°	0°	80°			
PATIENT 1	119	117	113	109	115	68	69	73	73	72	75	75	77	78	80	123	112	73	74	76	79			
		-4	(-3,4%)*				+4	(+5,9%)*				+5	(+6,7%)*				-11	(-8,9%)		+1	(+1,4%)		+3	(+3,9%)
PATIENT 2	163	152	151	149	156	90	89	84	83	89	72	70	69	69	76	160	154	89	82	71	72			
		-7	(-4,3%)*				-1	(-1,1%)*				+4	(+5,6%)*				-6	(-3,8%)		-7	(-7,9%)		+1	(+1,4%)
PATIENT 3	109	98	89	87	75	75	68	60	55	56	84	74	69	78	136	102	107	66	81	81	116			
		-34	(-31,2%)*				-19	(-25,3%)*				+52	(+61,9%)*				+5	(+4,9%)		+15	(+22,7%)		+35	(+43,2%)
PATIENT 4	126	111	118	111	104	62	59	65	68	61	73	81	87	89	101	110	105	56	52	73	109			
		-22	(-17,5%)*				-1	(-1,6%)*				+28	(+38,6%)*				-5	(-4,5%)		-4	(-7,1%)		+36	(+49,3%)

* : variations calculées entre les valeurs 0° et 80°

Annexe 7 : tableau des variations de la TAS, de la TAD et de la FC lors des épreuves d'orthostatisme statique et de marche en exosquelette

	ORTHOSTATISME STATIQUE						MARCHE					
	TAS (en mmHg)		TAD (en mmHg)		FC (en bpm)		TAS (en mmHg)		TAD (en mmHg)		FC (en bpm)	
	0 min	2 min	0 min	2 min	0 min	2 min	Repos	Marche*	Repos	Marche*	Repos	Marche*
PATIENT 1	120	108	82	72	88	80	108	118	72	87	80	85
	-12 (-12%)		-10 (-12,2%)		-8 (-9,1%)		+10 (+9,3%)		+15 (+20,8%)		+5 (+6,3%)	
PATIENT 2	171	172	95	95	71	72	172	152	95	88	72	73
	+1 (+0,6%)		0	0	+1 (+1,4%)		-20 (-11,6%)		-7 (-7,4%)		+1 (+1,4%)	
PATIENT 3	115	93	86	65	79	77	93	89	65	76	77	90
	-22 (-19,1%)		-21 (-24,4%)		-2 (-2,5%)		-4 (-4,3%)		+11 (+16,9%)		+13 (+16,9%)	
PATIENT 4	118	111	67	66	125	121	111	115	66	84	121	140
	-7 (-5,9%)		-1 (-1,5%)		-4 (-3,2%)		+4 (+3,6%)		+18 (+27,3%)		+19 (+15,7%)	

* : les valeurs de marche utilisées sont celles à vitesse lente

Annexe 8 : tableau des variations de la TAS, de la TAD et de la FC lors de l'effort de marche en exosquelette, à vitesse lente et à vitesse rapide

MARCHE EN EXOSQUELETTE

	TAS (en mmHg)		TAD (en mmHg)		FC (en bpm)	
	Lente	Rapide	Lente	Rapide	Lente	Rapide
PATIENT 1	118	122	87	70	85	86
	+4		-17		+1	
PATIENT 2	152	158	88	83	73	71
	+6		-5		-2	
PATIENT 3	89	102	76	70	90	71
	+13		-6		-19	
PATIENT 4	115	110	84	63	140	130
	-5		-21		-10	

Annexe 9 : tableau des variations de la TAS, de la TAD et de la FC lors de la verticalisation sur table (tilt lent et tilt rapide), après 3 semaines de rééducation

	TILT LENT						TILT RAPIDE					
	TAS (en mmHg)		TAD (en mmHg)		FC (en bpm)		TAS (en mmHg)		TAD (en mmHg)		FC (en bpm)	
	Session 1	Session 2	Session 1	Session 2	Session 1	Session 2	Session 1	Session 2	Session 1	Session 2	Session 1	Session 2
PATIENT 1	-4 (-3,4%)	-15 (-11,7%)	+4 (+5,9%)	+1 (+1,5%)	+5 (+6,7%)	+10 (+12,2%)	-11 (-8,9%)	-11 (-9,2%)	+1 (+1,4%)	0 (0%)	+3 (+3,9%)	+14 (+17,7%)
PATIENT 2	-7 (-4,3%)	-18 (-13%)	-1 (-1,1%)	+4 (+5,4%)	+4 (+5,6%)	+7 (+10,3%)	-6 (-3,8%)	-25 (-17,4%)	-7 (-7,9%)	-11 (-14,3%)	+1 (+1,4%)	+9 (+13,2%)
PATIENT 3	-34 (-31,2%)	-14 (-13%)	-19 (-25,3%)	-9 (-12,3%)	+52 (+61,9%)	+20 (+26,3%)	+5 (+4,9%)	-11 (-10,7%)	+15 (+22,7%)	-5 (-7,6%)	+35 (+43,2%)	+19 (+26,8%)
PATIENT 4	-22 (-17,5%)	-13 (-10,7%)	-1 (-1,6%)	-10 (-14,1%)	+28 (+38,6%)	+16 (+19,3%)	-5 (-4,5%)	0 (0%)	-4 (-7,1%)	+11 (+22%)	+36 (+49,3%)	+20 (+25%)

Annexe 10 : tableau des variations de la TAS, de la TAD et de la FC lors de la verticalisation en exosquelette (orthostatisme et marche), après 3 semaines de rééducation

	ORTHOSTATISME STATIQUE						MARCHE (vitesse lente)					
	TAS		TAD		FC		TAS		TAD		FC	
	<i>(en mmHg)</i>		<i>(en mmHg)</i>		<i>(en bpm)</i>		<i>(en mmHg)</i>		<i>(en mmHg)</i>		<i>(en bpm)</i>	
	Session 1	Session 2	Session 1	Session 2	Session 1	Session 2	Session 1	Session 2	Session 1	Session 2	Session 1	Session 2
PATIENT 1	-12 (-12%)	-20 (-16,5%)	-10 (-12,2%)	+13 (+25%)	-8 (-9,1%)	+1 (+1,2%)	+10 (+9,3%)	+3 (+3%)	+15 (+20,8%)	+4 (+6,2%)	+5 (+6,3%)	+3 (+3,4%)
PATIENT 2	+1 (+0,6%)	+17 (+13,6%)	0 (0%)	+3 (+4,2%)	+1 (+1,4%)	+2 (+2,6%)	-20 (-11,6%)	-12 (-8,5%)	-7 (-7,4%)	-8 (-10,7%)	+1 (+1,4%)	+3 (+3,8%)
PATIENT 3	-22 (-19,1%)	-8 (-7,8%)	-21 (-24,4%)	+2 (+3,1%)	-2 (-2,5%)	0 (0%)	-4 (-4,3%)	-4 (-4,2%)	+11 (+16,9%)	-8 (-11,9%)	+13 (+16,9%)	-10 (-13,5%)
PATIENT 4	-7 (-5,9%)	+2 (+1,9%)	-1 (-1,5%)	+2 (+3,7%)	-4 (-3,2%)	-3 (-2,7%)	+4 (+3,6%)	+41 (+37,6%)	+18 (+27,3%)	+54 (+96,4%)	+19 (+15,7%)	+38 (+34,9%)

AUTEUR(E) : Nom : BOLIK

Prénom : Anne-Sophie

Date de soutenance : 25 Octobre 2022

Titre de la thèse : Apport de la marche en exosquelette dans la rééducation des patients paraplégiques : focus sur l'adaptation cardiovasculaire

Thèse - Médecine - Lille 2022

Cadre de classement : Médecine

DES : Médecine Physique et de Réadaptation

Mots-clés : exosquelette, lésion médullaire, paraplégie, dysautonomie cardiovasculaire, réentraînement à l'effort

Résumé :

Contexte : la dysautonomie cardiovasculaire après une lésion médullaire peut entraver la prise en charge rééducative des patients. Les exosquelettes sont un moyen récent de rééducation mais nous manquons de preuve de leur intérêt dans le réentraînement cardiaque. L'objectif de l'étude était d'observer l'adaptation cardiovasculaire de patients paraplégiques lors de l'effort de marche en exosquelette.

Méthode : Quatre hommes paraplégiques ont été inclus, dont 2 présentant une lésion complète et 2 une lésion incomplète. Des enregistrements de la tension artérielle et de la fréquence cardiaque ont été réalisés lors d'épreuves de verticalisation sur table puis d'orthostatisme statique et de marche en exosquelette. Les enregistrements ont été renouvelés après 3 semaines de rééducation.

Résultats : La verticalisation sur table retrouve une régulation cardiovasculaire altérée chez les 4 patients. Dans l'exosquelette auto-équilibré, 3 patients sur 4 présentent une régulation cardiovasculaire altérée. Lors de la marche en exosquelette, l'adaptation cardiovasculaire est meilleure qu'en position statique, chez 3 patients sur 4. Les variations sont qualitativement similaires après 3 semaines de rééducation. Les patients présentant une lésion médullaire incomplète ont une meilleure régulation cardiovasculaire lors de l'effort de marche que les patients présentant une lésion médullaire complète.

Conclusion : les exosquelettes apportent un moyen novateur de rééducation à la marche. Ils permettent également la réalisation d'un effort physique d'intensité modérée. L'activité physique adaptée chez le patient blessé médullaire est importante pour réduire le risque cardiovasculaire, plus élevé chez ces patients que dans la population générale. La rééducation en exosquelette devrait donc, par tous les avantages qu'elle présente, faire partie intégrante de la prise en charge des patients blessés médullaires.

Composition du Jury :

Président : Monsieur le Professeur Luc DEFEBVRE

Asseseurs :

Monsieur le Professeur André THEVENON

Madame le Docteur Vinciane PARDESSUS

Madame le Docteur Valérie WIECZOREK

Directeur de thèse : Monsieur le Docteur Jean-Gabriel PREVINAIRE