

**THESE
POUR LE DIPLOME D'ETAT
DE DOCTEUR EN PHARMACIE**

**Soutenue publiquement le 27 novembre 2023
Par Mme Vasseur Gwendoline**

***Difficulté à la mobilité : prise en charge par des dispositifs
médicaux et innovation***

Membres du jury :

Président : Monsieur Blanchemain, Nicolas, Professeur des Universités,
Pharmacotechnie industrielle

Directeur, conseiller de thèse : Monsieur Blanchemain, Nicolas, Professeur des
Universités, Pharmacotechnie industrielle

Membre extérieur 1 : Madame Trépart Florence, Docteur en Pharmacie,
Responsable Technique Médicaments et Dispositifs Médicaux chez EFOR

Membre extérieur 2 : Monsieur Silvie Jean-Philippe, Docteur en Pharmacie,
Pharmacien Titulaire à Pharmacie du Théâtre

Faculté de Pharmacie de Lille
3 Rue du Professeur Laguesse – 59000 Lille
03 20 96 40 40
<https://pharmacie.univ-lille.fr>

Université de Lille

Président
Premier Vice-président
Vice-présidente Formation
Vice-président Recherche
Vice-présidente Réseaux internationaux et européens
Vice-président Ressources humaines
Directrice Générale des Services

Régis BORDET
Etienne PEYRAT
Christel BEAUCOURT
Olivier COLOT
Kathleen O'CONNOR
Jérôme FONCEL
Marie-Dominique SAVINA

UFR3S

Doyen
Premier Vice-Doyen
Vice-Doyen Recherche
Vice-Doyen Finances et Patrimoine
Vice-Doyen Coordination pluriprofessionnelle et Formations sanitaires
Vice-Doyen RH, SI et Qualité
Vice-Doyenne Formation tout au long de la vie
Vice-Doyen Territoires-Partenariats
Vice-Doyenne Vie de Campus
Vice-Doyen International et Communication
Vice-Doyen étudiant

Dominique LACROIX
Guillaume PENEL
Éric BOULANGER
Damien CUNY
Sébastien D'HARANCY
Hervé HUBERT
Caroline LANIER
Thomas MORGENROTH
Claire PINÇON
Vincent SOBANSKI
Dorian QUINZAIN

Faculté de Pharmacie

Doyen
Premier Assesseur et Assesseur en charge des études
Assesseur aux Ressources et Personnels
Assesseur à la Santé et à l'Accompagnement
Assesseur à la Vie de la Faculté
Responsable des Services
Représentant étudiant

Delphine ALLORGE
Benjamin BERTIN
Stéphanie DELBAERE
Anne GARAT
Emmanuelle LIPKA
Cyrille PORTA
Honoré GUISE

Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers (PU-PH)

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
Mme	ALLORGE	Delphine	Toxicologie et Santé publique	81
M.	BROUSSEAU	Thierry	Biochimie	82
M.	DÉCAUDIN	Bertrand	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	81
M.	DINE	Thierry	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	81
Mme	DUPONT-PRADO	Annabelle	Hématologie	82
Mme	GOFFARD	Anne	Bactériologie - Virologie	82
M.	GRESSIER	Bernard	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	81
M.	ODOU	Pascal	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	80
Mme	POULAIN	Stéphanie	Hématologie	82
M.	SIMON	Nicolas	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	81
M.	STAELS	Bart	Biologie cellulaire	82

Professeurs des Universités (PU)

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
M.	ALIOUAT	El Moukhtar	Parasitologie - Biologie animale	87
Mme	AZAROUAL	Nathalie	Biophysique - RMN	85
M.	BLANCHEMAIN	Nicolas	Pharmacotechnie industrielle	85
M.	CARNOY	Christophe	Immunologie	87
M.	CAZIN	Jean-Louis	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	86
M.	CHAVATTE	Philippe	Institut de Chimie Pharmaceutique Albert Lespagnol	86
M.	COURTECUISE	Régis	Sciences végétales et fongiques	87
M.	CUNY	Damien	Sciences végétales et fongiques	87
Mme	DELBAERE	Stéphanie	Biophysique - RMN	85
Mme	DEPREZ	Rebecca	Chimie thérapeutique	86
M.	DEPREZ	Benoît	Chimie bioinorganique	85
M.	DUPONT	Frédéric	Sciences végétales et fongiques	87

M.	DURIEZ	Patrick	Physiologie	86
M.	ELATI	Mohamed	Biomathématiques	27
M.	FOLIGNÉ	Benoît	Bactériologie - Virologie	87
Mme	FOULON	Catherine	Chimie analytique	85
M.	GARÇON	Guillaume	Toxicologie et Santé publique	86
M.	GOOSSENS	Jean-François	Chimie analytique	85
M.	HENNEBELLE	Thierry	Pharmacognosie	86
M.	LEBEGUE	Nicolas	Chimie thérapeutique	86
M.	LEMDANI	Mohamed	Biomathématiques	26
Mme	LESTAVEL	Sophie	Biologie cellulaire	87
Mme	LESTRELIN	Réjane	Biologie cellulaire	87
Mme	MELNYK	Patricia	Chimie physique	85
M.	MILLET	Régis	Institut de Chimie Pharmaceutique Albert Lespagnol	86
Mme	MUHR-TAILLEUX	Anne	Biochimie	87
Mme	PERROY	Anne-Catherine	Droit et Economie pharmaceutique	86
Mme	ROMOND	Marie-Bénédicte	Bactériologie - Virologie	87
Mme	SAHPAZ	Sevser	Pharmacognosie	86
M.	SERGHERAERT	Éric	Droit et Economie pharmaceutique	86
M.	SIEPMANN	Juergen	Pharmacotechnie industrielle	85
Mme	SIEPMANN	Florence	Pharmacotechnie industrielle	85
M.	WILLAND	Nicolas	Chimie organique	86

Maîtres de Conférences - Praticiens Hospitaliers (MCU-PH)

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
M.	BLONDIAUX	Nicolas	Bactériologie - Virologie	82
Mme	DEMARET	Julie	Immunologie	82
Mme	GARAT	Anne	Toxicologie et Santé publique	81
Mme	GENAY	Stéphanie	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	81

M.	LANNOY	Damien	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	80
Mme	ODOU	Marie-Françoise	Bactériologie - Virologie	82

Maîtres de Conférences des Universités (MCU)

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Secti on CNU
M.	AGOURIDAS	Laurence	Chimie thérapeutique	85
Mme	ALIOUAT	Cécile-Marie	Parasitologie - Biologie animale	87
M.	ANTHÉRIEU	Sébastien	Toxicologie et Santé publique	86
Mme	AUMERCIER	Pierrette	Biochimie	87
M.	BANTUBUNGI-BLUM	Kadiombo	Biologie cellulaire	87
Mme	BARTHELEMY	Christine	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	85
Mme	BEHRA	Josette	Bactériologie - Virologie	87
M.	BELARBI	Karim-Ali	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	86
M.	BERTHET	Jérôme	Biophysique - RMN	85
M.	BERTIN	Benjamin	Immunologie	87
M.	BOCHU	Christophe	Biophysique - RMN	85
M.	BORDAGE	Simon	Pharmacognosie	86
M.	BOSC	Damien	Chimie thérapeutique	86
M.	BRIAND	Olivier	Biochimie	87
Mme	CARON-HOUDE	Sandrine	Biologie cellulaire	87
Mme	CARRIÉ	Hélène	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	86
Mme	CHABÉ	Magali	Parasitologie - Biologie animale	87
Mme	CHARTON	Julie	Chimie organique	86
M.	CHEVALIER	Dany	Toxicologie et Santé publique	86
Mme	DANEL	Cécile	Chimie analytique	85
Mme	DEMANCHE	Christine	Parasitologie - Biologie animale	87
Mme	DEMARQUILLY	Catherine	Biomathématiques	85
M.	DHIFLI	Wajdi	Biomathématiques	27

Mme	DUMONT	Julie	Biologie cellulaire	87
M.	EL BAKALI	Jamal	Chimie thérapeutique	86
M.	FARCE	Amaury	Institut de Chimie Pharmaceutique Albert Lespagnol	86
M.	FLIPO	Marion	Chimie organique	86
M.	FURMAN	Christophe	Institut de Chimie Pharmaceutique Albert Lespagnol	86
M.	GERVOIS	Philippe	Biochimie	87
Mme	GOOSSENS	Laurence	Institut de Chimie Pharmaceutique Albert Lespagnol	86
Mme	GRAVE	Béatrice	Toxicologie et Santé publique	86
Mme	GROSS	Barbara	Biochimie	87
M.	HAMONIER	Julien	Biomathématiques	26
Mme	HAMOUDI-BEN YELLES	Chérifa-Mounira	Pharmacotechnie industrielle	85
Mme	HANNOTHIAUX	Marie-Hélène	Toxicologie et Santé publique	86
Mme	HELLEBOID	Audrey	Physiologie	86
M.	HERMANN	Emmanuel	Immunologie	87
M.	KAMBIA KPAKPAGA	Nicolas	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	86
M.	KARROUT	Younes	Pharmacotechnie industrielle	85
Mme	LALLOYER	Fanny	Biochimie	87
Mme	LECOEUR	Marie	Chimie analytique	85
Mme	LEHMANN	Hélène	Droit et Economie pharmaceutique	86
Mme	LELEU	Natascha	Institut de Chimie Pharmaceutique Albert Lespagnol	86
Mme	LIPKA	Emmanuelle	Chimie analytique	85
Mme	LOINGEVILLE	Florence	Biomathématiques	26
Mme	MARTIN	Françoise	Physiologie	86
M.	MOREAU	Pierre-Arthur	Sciences végétales et fongiques	87
M.	MORGENROTH	Thomas	Droit et Economie pharmaceutique	86
Mme	MUSCHERT	Susanne	Pharmacotechnie industrielle	85
Mme	NIKASINOVIC	Lydia	Toxicologie et Santé publique	86

Mme	PINÇON	Claire	Biomathématiques	85
M.	PIVA	Frank	Biochimie	85
Mme	PLATEL	Anne	Toxicologie et Santé publique	86
M.	POURCET	Benoît	Biochimie	87
M.	RAVAUX	Pierre	Biomathématiques / Innovations pédagogiques	85
Mme	RAVEZ	Séverine	Chimie thérapeutique	86
Mme	RIVIÈRE	Céline	Pharmacognosie	86
M.	ROUMY	Vincent	Pharmacognosie	86
Mme	SEBTI	Yasmine	Biochimie	87
Mme	SINGER	Elisabeth	Bactériologie - Virologie	87
Mme	STANDAERT	Annie	Parasitologie - Biologie animale	87
M.	TAGZIRT	Madjid	Hématologie	87
M.	VILLEMAGNE	Baptiste	Chimie organique	86
M.	WELTI	Stéphane	Sciences végétales et fongiques	87
M.	YOUS	Saïd	Chimie thérapeutique	86
M.	ZITOUNI	Djamel	Biomathématiques	85

Professeurs certifiés

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement
Mme	FAUQUANT	Soline	Anglais
M.	HUGES	Dominique	Anglais
M.	OSTYN	Gaël	Anglais

Professeurs Associés

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
M.	DAO PHAN	Haï Pascal	Chimie thérapeutique	86
M.	DHANANI	Alban	Droit et Economie pharmaceutique	86

Maîtres de Conférences Associés

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
------	-----	--------	------------------------	-------------

Mme	CUCCHI	Malgorzata	Biomathématiques	85
M.	DUFOSSE Z	François	Biomathématiques	85
M.	FRIMAT	Bruno	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	85
M.	GILLOT	François	Droit et Economie pharmaceutique	86
M.	MASCAUT	Daniel	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	86
M.	MITOUMBA	Fabrice	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	86
M.	PELLETIER	Franck	Droit et Economie pharmaceutique	86
M.	ZANETTI	Sébastien	Biomathématiques	85

Assistants Hospitalo-Universitaire (AHU)

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
Mme	CUVELIER	Élodie	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	81
M.	GRZYCH	Guillaume	Biochimie	82
Mme	LENSKI	Marie	Toxicologie et Santé publique	81
Mme	HENRY	Héloïse	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	80
Mme	MASSE	Morgane	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	81

Attachés Temporaires d'Enseignement et de Recherche (ATER)

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
Mme	GEORGE	Fanny	Bactériologie - Virologie / Immunologie	87
Mme	N'GUESSAN	Cécilia	Parasitologie - Biologie animale	87
M.	RUEZ	Richard	Hématologie	87
M.	SAIED	Tarak	Biophysique - RMN	85
M.	SIEROCKI	Pierre	Chimie bioinorganique	85

Enseignant contractuel

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement
M.	MARTIN MENA	Anthony	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière

Faculté de Pharmacie de Lille

3 Rue du Professeur Laguesse – 59000 Lille
03 20 96 40 40
<https://pharmacie.univ-lille.fr>

**L'Université n'entend donner aucune approbation aux
opinions émises dans les thèses ; celles-ci sont
propres à leurs auteurs.**

REMERCIEMENTS

A mon directeur et président de thèse, et ancien responsable de mon Master 2

Monsieur Nicolas BLANCHEMAIN, Professeur des Universités, Pharmacotechnie industrielle.

Je vous remercie pour votre soutien et compréhension et pour avoir accepté de suivre mon travail d'écriture de thèse malgré vos obligations.

Je vous remercie également de m'avoir fait découvrir le monde fascinant des dispositifs médicaux où je m'épanouie actuellement au niveau professionnel.

A mes juges,

Madame Trépant Florence,

Docteur en Pharmacie, Responsable Technique Médicaments et Dispositifs Médicaux chez EFOR.

Merci d'avoir accepté de juger mon travail. Au plaisir de continuer à travailler à tes côtés dans les prochaines années à venir

Monsieur Silvie Jean-Philippe

Docteur en Pharmacie, Pharmacien Titulaire à Pharmacie du théâtre

Je vous remercie d'avoir accepté de faire partie de ce jury et de m'avoir montré le rôle auprès des patients des pharmaciens d'officine.

A mes parents,

Merci du fond du cœur de m'avoir soutenu tout au long de mes études, ce qui m'a permis d'atteindre mes objectifs. Je vous en suis infiniment reconnaissante.

A Emmanuel, Claire, Serge et à mes grands-parents,

Merci pour votre présence et votre soutien tout au long de mon parcours.

A Alexandre, mon compagnon,

Merci de ton soutien, de ta compréhension et d'avoir toujours su me remotiver, me supporter et me réconforter dans les moments difficiles de mes études depuis que nous nous sommes rencontrés.

A mes collègues de master 2 et de pharmacie, Arthur et Martin,

Pour s'être soutenus pour les cours et examens tout au long du parcours de pharmacie industrie et du master 2.

A mon ami Sébastien,

Pour s'être soutenus et écoutés dans notre choix de faire du droit en parallèle de nos études de pharmacie et pour m'avoir remotivée à réaliser cette thèse. Je te souhaite toute la réussite dans la suite de ton parcours.

A Camille, Clémentine et Océane, mes amies les plus proches,

Merci de votre présence malgré mes études et nos vies respectives.

SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION	16
II.	LA MOBILITE	18
A.	Définition et enjeux de la mobilité.....	18
1.	Définition	18
2.	Enjeux de la mobilité.....	19
B.	Eléments influençant la mobilité.....	21
C.	Méthodes de mesures de la mobilité	24
1.	Tests sur la distance.....	24
2.	Tests chronométrés.....	25
3.	Autres types de tests.....	28
III.	PRISE EN CHARGE DES PATIENTS ATTEINTS DE DIFFICULTES A LA MOBILITE.....	33
A.	Planification et organisation de la prise en charge des patients.....	33
1.	Identification et compréhension des causes des dysfonctions de la mobilité.....	33
2.	Stratégie thérapeutique.....	37
B.	Choix des dispositifs médicaux d'aide à la mobilité.....	38
1.	Définition et intérêt des dispositifs d'aide à la mobilité.....	38
2.	Choix du DM le plus adapté au patient.....	39
IV.	DISPOSITIFS MEDICAUX D'AIDE A LA MOBILITE	41
A.	Exemples de dispositifs existants.....	41
1.	Les cannes	41
2.	Les déambulateurs.....	43
3.	Fauteuils roulants	45
4.	Prothèses.....	48
B.	Dispositifs innovants d'aide à la mobilité	52
1.	Définition de dispositif innovant.....	52
2.	Exemples d'innovation dans l'assistance à la mobilité.....	53
a.	Amélioration de dispositifs existants	54
i.	Utilisation de technologies existantes.....	54
ii.	Modification de la conception d'un DM	55
iii.	Rétroaction sensorielle	57
iv.	Stimulation électrique et contrôle neuromusculaire.....	59
v.	Interface cerveau-ordinateur.....	61
vi.	Intelligence artificielle.....	62
b.	Création de nouveaux types de dispositifs	65

i.	Biofeedback.....	65
ii.	Stimulation auditive.....	68
iii.	Stimulation électrique fonctionnelle.....	69
iv.	Robotiques et Exosquelettes.....	69
V.	DISCUSSION	74
VI.	BIBLIOGRAPHIE	76

LISTE DES ABBREVIATIONS

- 6MWT** : 6-Minute Walk Test (test de marche de 6 minutes)
- ANSM** : Agence Nationale de Sécurité du Médicament et des autres produits de santé
- AVC** : Accident Vasculaire Cérébral
- BCI** : Brain Computer Interface (Interface cerveau-ordinateur)
- BPCO** : Bronchopneumopathie chronique obstructive
- CSS** : Code de la Sécurité Sociale
- DM** : Dispositif médical
- EEG** : Electroencéphalogramme
- EES** : Epidural Electrical Stimulation (stimulation électrique épidurale)
- EHPAD** : Établissement d'Hébergement pour Personnes Âgées Dépendantes
- EMA** : European Medicines Agency (agence européenne des médicaments)
- EMG** : Electromyographique
- FDA** : Food and Drug Administration (administration américaine des denrées alimentaires et des médicaments)
- FES** : Functional Electrical Stimulation (stimulation électrique fonctionnelle)
- FOG**: Freezing Of Gait
- GABS**: Gait And Balance Scale
- HAS**: Haute Autorité de Santé
- HiMAT**: The High Level Mobility Assessment Tool
- IA** : Intelligence Artificielle
- LSA**: Life-Space Assessment
- LSM**: Life-Space Mobility
- MSWS-12** : Multiple Sclerosis Walking Scale (échelle de la marche de la sclérose en plaque)
- OCDE** : Organisation de Coopération et de Développement Economiques
- OMS** : Organisation Mondiale de la Santé
- TUG**: Timed Up and GO

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1: Évaluation de la mobilité basée sur des indices de performance (7)	35
Tableau 2: Tableau comparateur d'aides à la déambulation (28)	42
Figure 1: Modèle conique des déterminants de la mobilité (5)	18
Figure 2: Test Timed Up and Go (18)	27
Figure 3: Exemple de test de marche chronométrée sur 10 mètres (19)	27
Figure 4: Image du concept de Life Space (LSA et LSM) (20)	29
Figure 5: Exemple de questionnaire pour l'évaluation du LSA (20)	30
Figure 6: Exemple de questionnaire pour le MSWS-12 (22)	32
Figure 8: Exemple de canne (27)	42
Figure 10: Exemple de canne blanche (29)	43
Figure 11: Modèles de déambulateurs (26)	44
Figure 12: Modèles de fauteuils roulants (26)	45
Figure 13: Structure d'un fauteuil roulant manuel (30)	46
Figure 14: Structure d'un fauteuil roulant électrique (31)	47
Figure 15: Exemple de scooter de mobilité (32)	48
Figure 16: Exemples de prothèses de membre inférieur (33)	49
Figure 17: Schéma d'une prothèse de membre inférieur (34)	49
Figure 18: Modèle de prothèse de pied (26)	50
Figure 19: Re-Link Trainer (40)	55
Figure 20: Schéma d'une prothèse de jambe robotique (42)	56
Figure 21: Exemple de modèle de DM de rétroaction sensorielle (47)	58
Figure 22: Dispositif WalkAide (50).....	60
Figure 23 : Modèle de déambulateur utilisant l'IA (61).....	65
Figure 24: Fonctionnement des semelles de biofeedback (65)	66
Figure 25: DM de biofeedback dans le cadre de la maladie de Parkinson (68)	67
Figure 24: Exemples d'exosquelettes (73)	70
Figure 27: Exosquelette à propulsion du genou (77)	71
Figure 28: Exosquelette Kickstart (79)	72

I. INTRODUCTION

L'amélioration des soins médicaux et des conditions de vie entraînent un vieillissement de la population mondiale plus rapide. L'OMS estime qu'entre 2015 et 2050, le pourcentage d'adultes âgés de plus de 60 ans dans le monde devrait doubler, soit une augmentation de 900 millions à 2 milliards de personnes de plus de 60 ans. Le nombre de personne ayant plus de 80 ans devrait passer de 143 millions en 2019 à 426 millions en 2050. (1) (2)

Avec l'âge, les personnes sont plus exposées à un risque de diminution de leur capacités physiques et mentales ainsi qu'à des problèmes de santé. Ces personnes peuvent notamment souffrir d'une réduction de leur mobilité. Selon une enquête de l'OMS réalisée en 2011 dans 69 pays 18,6 % des plus de 18 ans rencontreraient des difficultés moyennes, graves ou extrêmes pour se déplacer. Selon une étude réalisée en 2007 aux îles Fidji, en Inde, en Indonésie, en Mongolie et aux Philippines, 1 personne sur 5 possède des troubles de la mobilité, et 1 personne sur 20 est confrontée à de graves difficultés pour se mobiliser. (3)

Outre le vieillissement de nombreuses pathologies (Parkinson, AVC, ...), les accidents de la vie peuvent entraîner des troubles de la mobilité pouvant dans certains cas amener à certaines formes de handicap. L'OMS estime dans son rapport mondial sur le handicap que plus de 1 milliard de personnes (soit 15 % de la population mondiale) présentent une forme de handicap pouvant être physique ou mentale. (3)

Ces difficultés au niveau de la mobilité peuvent avoir un impact sur les conditions et le niveau de vie des personnes, cela peut également impacter la société en générale. Pour pallier ces troubles de la mobilité, différentes stratégies thérapeutiques existent. L'une de ces stratégies est l'utilisation par le patient et/ou du personnel soignant de dispositifs médicaux permettant aux personnes rencontrant des difficultés de pouvoir améliorer leur mobilité.

A travers cette thèse, je vous présenterai la mobilité et ses enjeux, les moyens utilisés pour évaluer une difficulté à la mobilité, les éléments pouvant entraîner ces troubles et enfin la prise en charge des troubles de la marche notamment à travers l'utilisation de dispositifs médicaux dont les récentes innovations.

La rédaction de cette thèse a été réalisée via une recherche dans différentes bases de données de la littérature scientifiques tels que Google Scholar, PubMed mais

également sur des sites de références dans le domaine de la santé (OMS, ANSM, EMA, ...). Les mots-clés utilisés lors des recherches furent les suivants : mobilité, troubles de la mobilité, difficulté à la marche, dispositifs médicaux d'aide à la mobilité, dispositifs médicaux d'aide à la marche, prothèse, exosquelette, mobility, mobility disorders, walking difficulties, medical devices to aid mobility, medical devices to aid walking, prothesis, exoskeleton.

Les articles ont été sélectionnés selon leur pertinence avec le sujet de cette thèse.

II. LA MOBILITE

Pour comprendre la prise en charge des troubles de la marche il est important de définir la mobilité ainsi que ses enjeux.

A. Définition et enjeux de la mobilité

1. Définition

La mobilité est définie comme « Ce qui peut se mouvoir, changer de place ». Au niveau médical elle peut être définie comme « la capacité de se déplacer (par exemple, en marchant, en utilisant des appareils d'assistance ou en utilisant les transports) dans des environnements communautaires qui s'étendent de la maison, au voisinage et aux régions au-delà. ». L'OMS inclus dans la mobilité « les déplacements à l'intérieur et à l'extérieur ainsi que l'utilisation d'appareils fonctionnels et de moyens de transport ». La mobilité englobe donc la capacité de se mouvoir mais également la capacité de se déplacer à l'intérieur au sein de son habitation avec par exemple les déplacements autour de son lit, la réalisation de transfert (passage d'une chaise à une autre, du lit au fauteuil, etc), mais aussi à l'extérieur. Elle comprend également la vitesse de marche et la capacité de se tenir en position debout avec un pied devant l'autre. (4) (5) (6) (7)

La mobilité peut être décrite via cinq facteurs considérés comme fondamentaux (Figure 1) : Cognitifs, Psychosociaux, Physiques, Environnementaux et Financiers. (5)

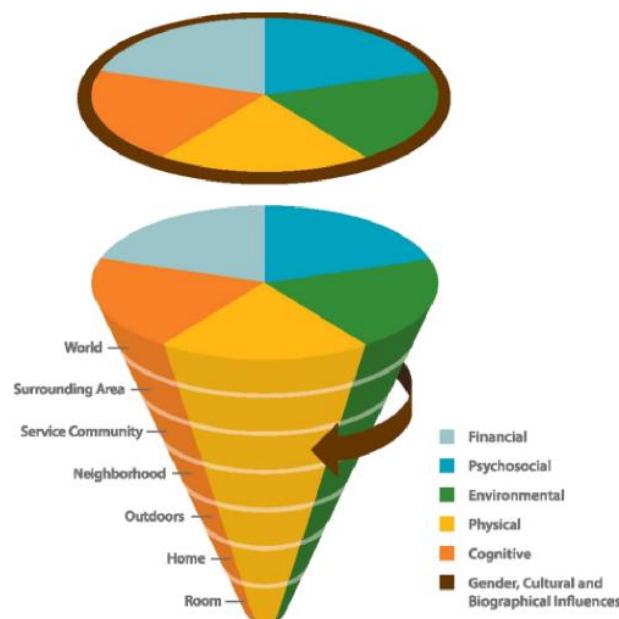


Figure 1: Modèle conique des déterminants de la mobilité (5)

Ces cinq déterminants ont un impact à tous les niveaux de l'espace de déplacement de la personne. Ces espaces de déplacement sont considérés comme « le cadre » de la mobilité. Ce cadre est composé de zones de mobilité qui sont de plus en plus éloignées du domicile de la personne et exigeant de plus en plus de capacité à se déplacer. Plus l'espace est grand et/ou éloigné, plus l'influence de chaque facteur est importante. Par exemple, la capacité physique d'une personne aura une plus grande importance pour le déplacement d'une pièce à l'autre de l'habitation par rapport au déplacement du lit au fauteuil dans la chambre. Ces zones de mobilité sont variables selon les personnes et leur mode de vie. Elles peuvent comprendre les lieux suivants : le domicile, le quartier d'habitation, la ville ou le village, le lieu de travail, les services environnants (banques, magasins, maison de santé, ...), le monde. (5)

Dans ce modèle, en plus des déterminants, il existe des influences dites « transversales » considérées comme essentielles pouvant jouer sur la mobilité des personnes telles que : le genre, la culture, l'histoire personnelle de la personne. (5)

Du fait de ces déterminants, il est constaté que la mobilité demande aux personnes une certaine attention mais également un certain niveau de force et/ou capacité musculaire ainsi qu'un contrôle moteur efficace permettant de coordonner les informations musculaires et sensorielles. Ainsi les difficultés de mobilité causent une limitation d'activité mais également des déficiences. Ces difficultés à se mouvoir peuvent avoir différentes origines et avoir un impact plus ou moins important dans le quotidien des personnes, comme le ralentissement de la vitesse de la marche, la perte de la fluidité de la marche ou encore la perte de la synchronisation des mouvements. (6) (7)

2. Enjeux de la mobilité

Les enjeux de la mobilité sont multiples que ce soit au niveau de la personne ayant des troubles de la marche mais également au niveau de la société. La mobilité est une capacité motrice qui possède une influence extrêmement importante sur le mode et la qualité de vie des personnes. Une personne souffrant de difficultés à se mouvoir peut voir sa qualité de vie, sa santé, et son indépendance fortement impactées selon le niveau d'altération de la marche. (8)

Ces enjeux sont fortement impactés selon l'âge des personnes. Pour les personnes de plus de 60 ans, un des enjeux est l'indépendance, la possibilité de vivre dans son

propre domicile. Il a été constaté que plus la probabilité d'admission en maison de retraite augmente plus la capacité de la personne à se mouvoir dans son espace de vie diminue. La capacité de se mouvoir est un facteur fondamental dans le vieillissement actif des personnes, leur indépendance et leur aptitude à réaliser des tâches de la vie quotidienne et donc du risque de devoir être admis dans des centres de long séjour (EHPAD). La mobilité est un élément central du bien-être et de l'indépendance chez la personne âgée. La mobilité permet selon ce modèle conique de déterminer si les besoins de la vie quotidienne et les besoins « supérieurs » tels que la vie sociale sont satisfaits pour permettre le bien-être des personnes. En cas de difficulté pour se mouvoir, les personnes âgées risquent de se retrouver isolées de la société entraînant une augmentation de dépressions et dans certains cas de troubles cognitifs. (5) (7) (8)

Pour les personnes plus jeunes, en particulier les enfants, les troubles de la mobilité auront un impact sur la structure et les fonctions du corps lors de son développement. Ces conséquences auront un impact sur la santé de l'enfant dans l'avenir mais également sur sa vie sociale : l'enfant peut rencontrer des difficultés pour aller dans certains établissements scolaires, pratiquer certaines activités et lors de l'âge adulte pour trouver un emploi. (9)

Comme vu précédemment, un des principaux enjeux de la mobilité est la santé des personnes quel que soit leur âge. Les troubles de la mobilité peuvent entraîner des risques de chutes et de blessures tel que des fractures, un comportement sédentaire qui peut s'associer à une obésité du fait du manque d'activité physique, obésité qui peut elle-même entraîner d'autres pathologies tels que des pathologies cardiovasculaires, des troubles métaboliques (diabète) et par conséquent une augmentation du risque de décès notamment chez les personnes âgées. (5) (7) (8)

Le principal risque lié à la mobilité est le risque de chutes. Selon l'OMS, les chutes sont la deuxième cause de décès accidentels ou de décès par traumatisme involontaire dans le monde. Environ 37.3 millions de chutes nécessitent des soins médicaux, et environ 684 000 personnes décèdent chaque année suite à une chute, la majorité de ces personnes ont plus de 60 ans (10).

Ces effets sur la santé des personnes ont également un impact sur la société en ayant un enjeu économique pour cette dernière. Les pathologies et accidents liés à la

mobilité entraînent des coûts à la société : les soins nécessaires pour prendre en charge les patients ainsi que les ressources pour les soigner.

B. Éléments influençant la mobilité

La mobilité peut être influencée par différents facteurs qui auront un impact plus ou moins important. Parmi les principaux facteurs pouvant causer des troubles de la mobilité, on trouve les pathologies (congénitale, neurologique, musculosquelettique, secondaire à une autre maladie sévère, etc.), les facteurs sociodémographiques (âge, éducation, sexe) et les conséquences d'un traumatisme (accident, chute). (9)

Au niveau des pathologies, elles peuvent sur le plus ou moins long terme entraîner des difficultés à la mobilité voire une incapacité complète de se mouvoir, entraînant dans certains cas un handicap. De nombreuses pathologies peuvent affecter la capacité de la marche. On peut citer la maladie de Parkinson, certains types d'arthrose touchant les membres inférieurs et/ou le rachis, des anomalies des pieds et/ou des membres inférieurs, les hémiplésies, la sclérose en plaque, les AVC, les traumatismes des membres inférieurs et les traumatismes crâniens, les lésions cérébrales, la maladie de Guillain-Barré mais également la dépression, la dénutrition et l'obésité, la BPCO, etc. (6) (8) (11) Ces pathologies entraînent différents troubles (locomoteurs, neuromusculaires, musculosquelettiques) dont la diminution de la force musculaire, des pertes de l'équilibre, un rétrécissement du canal rachidien, etc. Ces troubles étant le plus souvent la cause sous-jacente de la dysfonction de la mobilité. (7) (11)

Parmi les troubles d'origine neurologiques qui ont pour effet d'affecter la marche, se trouvent les démences, les troubles du mouvement volontaire et troubles cérébelleux, les neuropathies sensitives ou motrices. Dans la maladie de Parkinson, la mobilité est impactée par les symptômes moteurs de la pathologie tels que la difficulté de marche causée par la triade de ces symptômes que sont l'akinésie, les tremblements et l'hypertonie, ainsi que par des symptômes non moteurs tel que la douleur. (7) (8) (12)

Selon des études sociodémographiques l'âge est également un des facteurs principaux impactant la mobilité. Les troubles de la mobilité touchent également les enfants dans 2% des cas mais le vieillissement reste associé à une augmentation accrue de difficulté à la mobilité. (8) (9) Les effets physiques liés à l'âge : déficience de la vision, augmentation du temps de réaction, douleurs, faiblesses musculaires et

la diminution de la perception (facteur cognitif), rendent parfois difficile l'appréhension de l'environnement (facteur fondamental de la mobilité) (Figure 1). La personne âgée ne peut appréhender correctement son environnement ce qui diminue sa mobilité et entraîne un danger pour la personne et pour autrui par exemple la conduite de nuit ou en cas de pluie, marcher dans un environnement avec un éclairage faible, passer un obstacle tel qu'un trottoir, etc. (5)

Des études ont démontré que les troubles cognitifs affectent la vitesse de la marche, la longueur des pas et le caractère lisse de la marche. Les troubles cognitifs pouvant être déterminants pour la mobilité sont assez nombreux : l'état mental de la personne, sa mémoire, la vitesse de traitement de l'information, les fonctions exécutives. (5) (7)

Pour les personnes âgées, la difficulté liées à la mobilité peut être induite par l'entourage de la personne (famille, amis, personnels de santé, etc.) qui conseille, voire l'oblige, à limiter sa mobilité par appréhension de la mobilité ou par peur du risque de chute engendrant une diminution de ces capacités physiques (facteur physique Figure 1). Cela crée une auto-restriction de la personne sur sa mobilité entraînant à long terme des difficultés voire des troubles de la mobilité. Elle peut avoir pour conséquence une diminution des capacités physiques, une appréhension, et à long terme des difficultés voire des troubles de la mobilité. L'auto-restriction peut, chez la personne âgée, être causée suite à une des pathologies citées précédemment qui est la dépression. Ces effets liés à l'âge et à l'influence de l'entourage sont des déterminants dit psychosociaux comprenant la capacité et les comportements d'adaptation à un environnement, la dépression, la peur et les relations sociales. Ces éléments influent sur la motivation d'une personne à se mouvoir. Si le patient n'a pas l'envie de marcher cela peut entraîner une déficience à long terme de ses capacités à se mobiliser suite par exemple à une diminution de sa masse musculaire. (5)

Selon la Commission des déterminants sociaux de la santé (2008) et de l'OMS (2002), parmi les facteurs sociodémographiques se trouve l'influence de l'éducation, de la culture et du sexe en tant que facteur de la mobilité. Il a été constaté que les femmes sont plus à risque de développer des difficultés à la mobilité par rapport aux hommes. Le sexe n'est pas considéré comme un des facteurs clés de la mobilité mais comme la culture ou l'histoire de la personne, il influence la mobilité (Figure 1). (5) (8)

Le facteur financier peut également affecter la mobilité dans sa globalité. Des études ont démontré que le risque de mobilité réduite étant d'autant plus important lorsque les personnes ont un faible revenu. (5) (8)

Parmi les autres facteurs pouvant impacter la mobilité, on retrouve les traumatismes (accidents de la circulation, chutes graves, etc.). Ils peuvent avoir pour conséquence une atteinte du système nerveux ou neuromusculaire. Dans ces situations, les troubles de la mobilité sont très fréquents, touchant la capacité de la marche, les mouvements du quotidien, les transferts type lit-fauteuil, et parfois même la capacité d'utiliser complètement les membres inférieurs et/ou supérieurs. (13)

À la suite d'une chute plus ou moins grave, les personnes, en particulier les personnes âgées, peuvent voir leur mobilité diminuée pour différentes raisons. La chute en elle-même peut causer une diminution de la mobilité à la suite d'une atteinte physiologique. La chute peut entraîner une peur de tomber que ce soit chez les personnes ayant déjà chuté ou chez les personnes qui ne sont jamais tombé. Cette peur entraîne une auto-restriction des personnes à se mouvoir limitant ainsi les mouvements ou limitant l'espace de déplacement de la personne, causant à long terme une diminution de la capacité de la marche et à réaliser certains mouvements. (5) (8) Il est estimé qu'environ un tiers des personnes de plus de 65 ans ont eu une chute une fois par an ayant différentes causes (mauvais contrôle postural, troubles de l'équilibre, mauvaise démarche). Il a été constaté qu'une personne ayant déjà chuté à un risque supplémentaire de tomber à nouveau, ce qui renforce la peur de la chute. (14)

Tous ces facteurs peuvent avoir un effet sur la capacité de marcher, mais avec différents niveaux d'impact selon la situation personnelle de chaque personne. L'OMS estime que le nombre de personnes souffrant de troubles de la mobilité, notamment de handicap, devrait augmenter dans les années à venir sous l'effet du vieillissement démographique, de l'augmentation des affections chroniques (diabète, AVC, ...), mais également à la suite des conflits armés, des catastrophes naturelles. Cette hausse de personnes ayant des troubles de la mobilité demande une amélioration de la prise en charge notamment par des dispositifs médicaux. (3) Avant de pouvoir prendre en charge ces patients il est nécessaire de savoir si la personne souffre de troubles de la mobilité et de déterminer le niveau de difficulté.

C. Méthodes de mesures de la mobilité

Outre les situations évidentes de troubles de la mobilité telles que l'absence d'un membre et certaines formes de paralysie, de nombreuses méthodes sont à disposition des personnels de santé pour identifier les dysfonctions de la mobilité et notamment de la marche chez un patient. (6)

Le principe de ces différents tests est d'évaluer 6 éléments de la marche dans le but d'estimer le niveau des troubles de la marche et/ou de la mobilité et dans certains cas d'identifier la cause possible de ces troubles : (7)

- L'équilibre
- La vitesse de marche
- La cadence
- La longueur du pas
- La hauteur du pas
- L'asymétrie ou la variabilité du rythme de marche

Ces méthodes d'évaluation peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Les tests évaluant la distance parcourue
- Les tests chronométrés

Il existe de nombreux tests évaluant la mobilité des personnes mais aucun *Gold Standard* n'est défini dans ce domaine. Les professionnels de santé jugeront quel sera le test le plus adapté au patient et à la pathologie suspectée. Voici une liste non exhaustive des principaux tests utilisés dans le domaine de la mobilité.

1. Tests sur la distance

Les tests sur la distance vont évaluer la distance que le patient peut parcourir sur un temps donné. Ils permettent aux praticiens d'estimer l'endurance du patient. (6)

La cadence de marche est un des éléments évalués. Elle se mesure via le nombre de pas effectués/min et varie en fonction de la longueur des jambes du patient. Chez un adulte de grande taille (1.80 m), elle est estimée à 90 pas/min et à 125 pas/min pour un adulte de petite taille (1.50 m). (7)

Un autre élément mesuré est la longueur du pas qui est déterminé en mesurant la distance parcourue en 10 pas et en divisant ce nombre par 10. Sachant que la taille

du pied est liée à la taille de la personne, celles de petites tailles effectuent des pas plus courts que celles de grandes tailles. Une longueur de pas normale est estimée à 3 fois la longueur du pied, une longueur de pas anormale est inférieure à 2 fois la longueur du pied. (7)

Les tests de marche à distance sont généralement effectués sur un temps de deux, six, dix ou douze minutes avec une vitesse de marche dite « confortable » choisie par le patient lui-même. (6) Ce test ne possède pas de standard, le praticien peut demander au patient de réaliser un parcours en ligne droite, possédant un virage, une marche en cercle, etc. (6)

Un des tests de marches les plus utilisés est le test de marche de 6 minutes (ou « 6-minute walk test » 6MWT). Ce test permet d'évaluer la capacité d'exercice fonctionnelle des patients atteints de pathologie cardiopulmonaire. Le 6MWT est utilisé chez les patients de tout âge. Il mesure la distance parcourue par le patient en six minutes. (15) Ce test est utilisé dans le suivi clinique des patients atteints de maladies cardiaques et/ou pulmonaires pour déterminer l'évolution de leur capacité fonctionnelle à la suite d'une prise en charge thérapeutique. Ceci se fait via l'utilisation d'une échelle de comparaison (capacité non détériorée, détériorée ou améliorée) en comparant le résultat du 6MWT avant et après la prise en charge (16)

2. Tests chronométrés

Les tests chronométrés permettent d'analyser la vitesse de la marche. Les patients doivent marcher sur une distance fixe (en général 6 ou 8 mètres) et sont chronométrés. Chez les personnes âgées la vitesse de marche en bonne santé est située entre 1.1 et 1.5 m/s. (7)

L'équilibre est le deuxième élément évalué via ce type de test. Le professionnel de santé demande au patient de se tenir sur ses deux pieds en position dite de "tandem" (talon touchant les orteils) et également sur un pied. Le patient doit tenir le plus longtemps possible dans chacune de ces positions. Le temps de référence étant de ≥ 5 s. (7)

Un des tests les plus utilisés pour déterminer le niveau de mobilité des personnes est le *Timed Up and Go* (TUG) développé en 1991 par Richardson et Podsiadlo. (17) Ce test est une version modifiée et chronométrée d'un test utilisé pour évaluer l'équilibre et estimer le risque de chute des personnes : le *Get Up and Go*. (11) (17) A l'origine,

il fut conçu pour améliorer le dépistage du risque de chute chez les personnes âgées puis utilisé chez les personnes souffrant de maladies neurologiques et finalement utilisé chez toutes personnes pouvant souffrir de troubles de la mobilité ou de l'équilibre. (6)

Le TUG est très simple de réalisation et peut être effectué par les médecins généralistes en consultation, par les personnels hospitaliers ou les kinésithérapeutes. Il permet d'évaluer la mobilité, le risque de chute et l'équilibre des personnes. (11) (17)

Même si il n'existe aucune méthodologie standard pour sa réalisation, il consiste à effectuer l'enchaînement suivant par le patient (Figure 2): (6) (11) (17)

- Le patient est assis sur une chaise et doit se lever
- Il marche 3 mètres devant lui
- Il fait demi-tour et doit retourner vers sa chaise et s'asseoir.

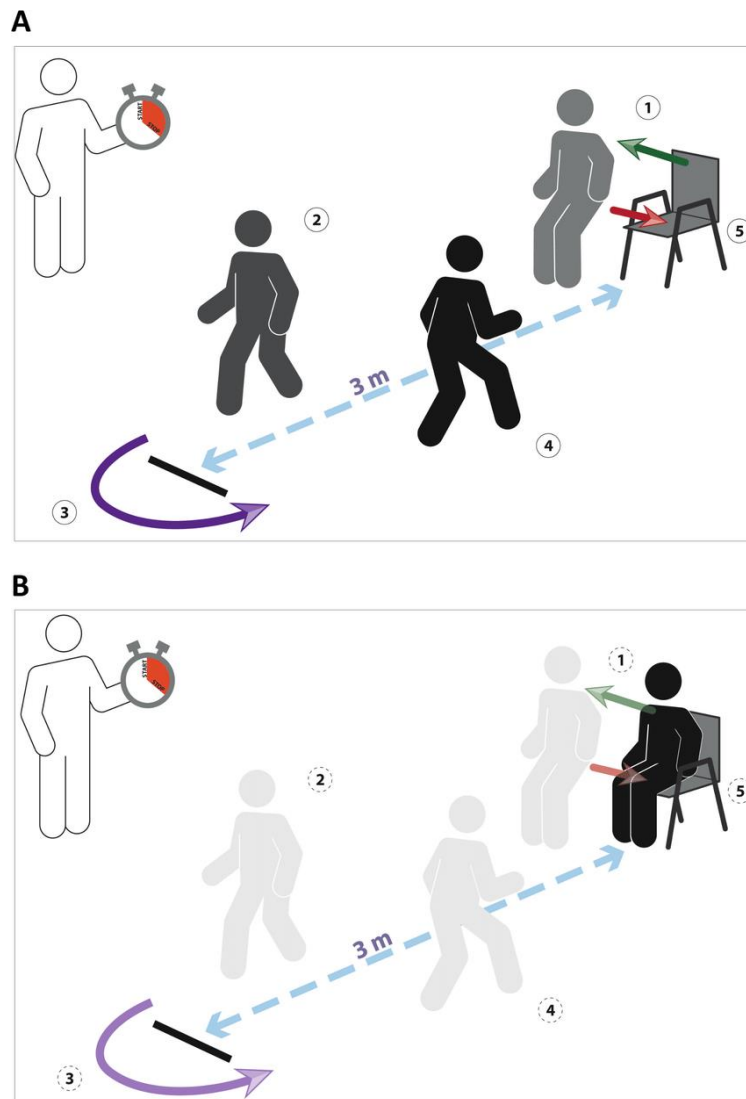


Figure 2: Test Timed Up and Go (18)

Les résultats du test sont donnés en secondes. Un temps est considéré normal si le patient a effectué le test en moins de 20 secondes.

Les avantages de ce test sont sa reproductibilité et sa facilité de réalisation peu importe le lieu (domicile du patient, établissement de santé, etc.). Ce test possède une sensibilité de 87%, une spécificité de 87% et une bonne corrélation avec d'autres outils d'évaluation. (11) (17) Il fut dans un premier temps utilisé uniquement chez les adultes, en particulier chez la personne âgée, et a commencé à être utilisé dans l'évaluation des troubles de la marche et de l'équilibre chez les enfants et les adolescents dans le cadre de paralysie cérébrale et traumatisme crânien. (17)

Outre le TUG, les tests de marche chronométrés déterminent la difficulté à la marche en évaluant le temps pris par un patient pour parcourir une distance définie (5, 10 et 30 mètres). Ils permettent d'évaluer la vitesse de la marche en m/s.

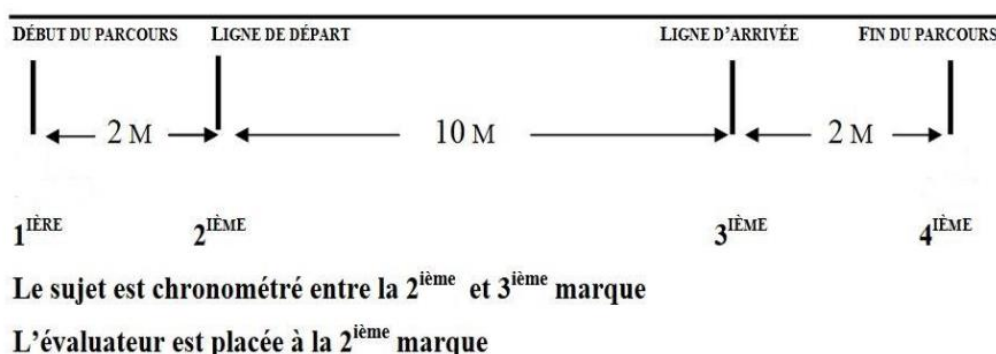


Figure 3: Exemple de test de marche chronométrée sur 10 mètres (19)

Ce test peut être réalisé de différentes façons différentes : en ligne droite ou inclure des virages, l'utilisation ou non d'un dispositif médical (DM). Le rythme de marche peut également varier (choisi par le patient ou le praticien, rythme « confortable » ou à un rythme rapide pour le patient). (6) Par exemple la Figure 3 représente un test réalisé pour un essai sur des patients, le test est réalisé sur 10 mètres en ligne droite avec 2 mètres en début de parcours avant la ligne de départ permettant au patient d'arriver à une vitesse constante et une zone de décélération de 2 mètres après la ligne d'arrivée.

3. Autres types de tests

Outre les deux catégories de méthodes d'évaluation citées précédemment, il existe des tests qui n'évaluent ni la distance parcourue ni le temps nécessaire pour effectuer une action. Ces méthodes peuvent évaluer la hauteur du pas.

Le personnel médical observe le balancement du pied du patient : si le pied touche le sol en phase de balancement, il peut y avoir un risque de chute. En plus d'une dysfonction de la marche ce test permet de détecter une peur de la chute chez le patient pouvant causer un trouble "de la marche précautionneuse". Le patient pose volontairement le pied lors de la phase de balancement en pensant avoir une meilleure stabilité. Sur des surfaces non lisses (tapis, sol abîmé) ou glissantes, la « marche précautionneuse » augmente le risque de chute (7)

Un autre test est le test de l'asymétrie qui permet de détecter une variabilité du rythme de marche. Il est réalisé par le praticien en murmurant un rythme à chaque pas du patient "dum... dum... dum". (7)

Un des tests les plus utilisés aux Etats-Unis est la mesure du *Life-Space Assessment* (LSA) développé par Baker à l'Université de l'Alabama en 2003. Cet instrument permet de mesurer le *Life Space mobility* (LSM) qui évalue la mobilité des personnes dans différents environnements de la vie quotidienne. (8) (20) La LSA évalue la mobilité dans cinq environnements dans les 4 semaines qui précèdent l'évaluation : (Figure 4) (8) (20)

- Hors de la chambre
- Hors de la maison
- Dans le quartier
- Hors du quartier mais en ville
- Et hors de la ville

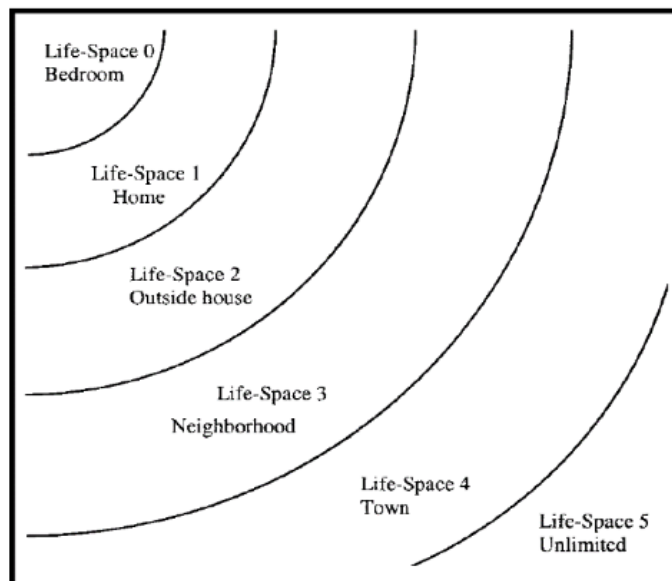


Figure 4: Image du concept de Life Space (LSA et LSM) (20)

La chambre du patient est considérée comme le niveau 0 soit le point de départ des déplacements. Les déplacements sont enregistrés quotidiennement par le patient (pouvant être aidé par un tiers) dans un questionnaire ou un journal. (Figure 5) (20)

Name:					Date:				
These questions refer to your activities just within the past month.									
LIFE-SPACE LEVEL			FREQUENCY				INDEPENDENCE	SCORE	
During the past four weeks, have you been to . . .			How often did you get there?				Did you use aids or equipment? Did you need help from another person?	Level X Frequency X Independence	
<i>Life-Space Level 1. . .</i> Other rooms of your home besides the room where you sleep?	Yes	No	Less than 1 /week	1-3 times /week	4-6 times /week	Daily	1 = Personal assistance 1.5 = Equipment only 2 = No equipment or personal assistance	<u>6</u> <i>Level 1 Score</i>	
<i>Score</i>	1	0	1	2	3	4	1.5 =		
<i>Life-Space Level 2. . .</i> An area outside your home such as your porch, deck or patio, hallway (of an apartment building) or garage, in your own yard or driveway?	Yes	No	Less than 1 /week	1-3 times /week	4-6 times /week	Daily	1 = Personal assistance 1.5 = Equipment only 2 = No equipment or personal assistance	<u>12</u> <i>Level 2 Score</i>	
<i>Score</i>	2	0	1	2	3	4	1.5 =		
<i>Life-Space Level 3. . .</i> Places in your neighborhood, other than your own yard or apartment building?	Yes	No	Less than 1 /week	1-3 times /week	4-6 times /week	Daily	1 = Personal assistance 1.5 = Equipment only 2 = No equipment or personal assistance	<u>9</u> <i>Level 3 Score</i>	
<i>Score</i>	3	0	1	2	3	4	1.5 =		
<i>Life-Space Level 4. . .</i> Places outside your neighborhood, but within your town?	Yes	No	Less than 1 /week	1-3 times /week	4-6 times /week	Daily	1 = Personal assistance 1.5 = Equipment only 2 = No equipment or personal assistance	<u>8</u> <i>Level 4 Score</i>	
<i>Score</i>	4	0	1	2	3	4	1 =		
<i>Life-Space Level 5. . .</i> Places outside your town?	Yes	No	Less than 1 /week	1-3 times /week	4-6 times /week	Daily	1 = Personal assistance 1.5 = Equipment only 2 = No equipment or personal assistance	<u>0</u> <i>Level 5 Score</i>	
<i>Score</i>	5	0	1	2	3	4	1.5 =		
TOTAL SCORE (ADD)								<u>35</u> <i>Sum of Levels</i>	

Figure 5: Exemple de questionnaire pour l'évaluation du LSA (20)

Un score est attribué en multipliant chaque niveau d'espace de vie avec la fréquence hebdomadaire moyenne de déplacement et le degré d'indépendance (utilisation de dispositif médical ou aide par un tiers). Le score obtenu varie de 0 à 120, plus le score est élevé plus la mobilité de la personne est importante. La fiabilité du test est de 96%. (8) (20) En plus d'évaluer la mobilité, le LSA permet de comprendre les facteurs liés à l'environnement qui peuvent impacter la mobilité du patient : le quartier, l'habitation non adaptée, etc. et d'identifier les obstacles. Cette compréhension de l'environnement permet d'orienter vers des solutions plus adaptées au patient. (20)

Certaines méthodes de mesure de la mobilité sont spécifiques à une pathologie. Par exemple, l'échelle de marche et d'équilibre complète « *Gait And Balance Scale* »

(GABS) est une mesure de la mobilité utilisée notamment dans la maladie de Parkinson. Cette échelle mesure les éléments essentiels de la marche et de l'équilibre : la marche, le freezing, le cycle de la marche, l'équilibre, la posture. (6) (21) Cette échelle se compose de 2 éléments : l'anamnèse du patient et la mesure de 14 paramètres de la marche réalisée lors de l'examen du patient (se lever de la chaise, posture, stabilité posturale, test de marche de 5 mètres, etc.) (21)

Pour les personnes souffrant de lésions cérébrales traumatiques, il existe l'outil d'évaluation de la mobilité de haut niveau « *The High Level Mobility Assessment Tool* » (HiMAT). Il permet d'évaluer la marche dans différents milieux : en pente, sur différentes surfaces, sur de longues distances, avec des changements de directions, etc. (6)

Lors de la prise en charge des personnes atteintes de sclérose en plaque, la mobilité peut être évaluée via l'échelle de la marche de la sclérose en plaque « *Multiple Sclerosis Walking Scale* » (MSWS-12). Elle mesure 12 points (capacité de marcher, de courir, de monter/descendre des escaliers, etc.) durant 2 semaines via un questionnaire/journal (*Figure 6*) fourni au patient où il doit chiffrer sa capacité sur une échelle de 1 (aucune limitation de la marche) à 5 (extrêmement limité). Un score est généré donnant un score de 1 à 100. (6)

<i>In the past two weeks, how much has your MS . . .</i>	Not at all	A little	Moderately	Quite a lot	Extremely
1. Limited your ability to walk?	1	2	3	4	5
2. Limited your ability to run?	1	2	3	4	5
3. Limited your ability to climb up and down stairs?	1	2	3	4	5
4. Made standing when doing things more difficult?	1	2	3	4	5
5. Limited your balance when standing or walking?	1	2	3	4	5
6. Limited how far you are able to walk?	1	2	3	4	5
7. Increased the effort needed for you to walk?	1	2	3	4	5
8. Made it necessary for you to use support when walking indoors (eg holding on to furniture, using a stick, etc.)?	1	2	3	4	5
9. Made it necessary for you to use support when walking outdoors (eg using a stick, a frame, etc.)?	1	2	3	4	5
10. Slowed down your walking?	1	2	3	4	5
11. Affected how smoothly you walk?	1	2	3	4	5
12. Made you concentrate on your walking?	1	2	3	4	5

Figure 6: Exemple de questionnaire pour le MSWS-12 (22)

Ces tests permettent d'identifier une dysfonction de la marche chez les patients, et de les prendre en charge correctement en appliquant la stratégie thérapeutique adaptée.

III. PRISE EN CHARGE DES PATIENTS ATTEINTS DE DIFFICULTES A LA MOBILITE

La mobilité peut avoir un impact sur la qualité de vie des personnes, une prise en charge adaptée est nécessaire pour permettre aux personnes souffrantes de dysfonction de la mobilité d'avoir un niveau de vie et d'indépendance convenable selon le type de handicap.

A. Planification et organisation de la prise en charge des patients

La prise en charge des patients peut être pluridisciplinaire. Un diagnostic de difficulté à la mobilité peut être effectué par un médecin généraliste, un masso-kinésithérapeute, un médecin spécialiste tel qu'un neurologue, un expert dans certaines pathologies, un praticien hospitalier, etc. (7)

1. Identification et compréhension des causes des dysfonctions de la mobilité

La prise en charge des troubles à la mobilité d'un patient peut être initiée de deux façons.

- Dans le cadre d'une prise en charge d'un patient à la suite d'une pathologie (par exemple à la suite d'un AVC). Pour lutter contre les difficultés à la mobilité découlant de son AVC le patient devra éviter l'immobilité et aura une rééducation post-AVC réalisée par un masso-kinésithérapeute pour augmenter la fonction physique, la vitesse et l'indépendance de la marche. (23)
- Dans le cadre d'une lésion de la moelle épinière pouvant causer des difficultés à la mobilité, la mise en place d'une stratégie thérapeutique pour lutter contre les troubles de la marche sera non prioritaire. Pour ce type de pathologie, qui résulte d'un traumatisme (90% des cas) ou d'une maladie (cancer), il faut une prise en charge adaptée et en temps utile. Dans un premier temps, il faut une prise en charge avec reconnaissance de la lésion et une immobilisation de la colonne vertébrale. Quand la lésion est bien prise en charge, une évaluation des complications, comme les difficultés à marcher, est réalisée pour permettre la mise en place d'une stratégie thérapeutique. (24)

En connaissant la pathologie du patient le professionnel de santé peut déduire le type de troubles de la mobilité dont le patient peut être atteint. Il peut prévoir les possibles évolutions et mettre en place une prise en charge la plus adaptée possible. Dans

certain cas tel que la lésion médullaire, la prise en charge de la pathologie est prioritaire par rapport aux troubles de la mobilité. Soit la prise en charge des troubles de la mobilité découle de la déclaration du patient de ses difficultés à se mouvoir ou soit par l'identification par les professionnels de santé lors du suivi de santé.

Dans ce cas, une recherche de la cause de ces troubles de la mobilité doit être réalisée pour comprendre la nature et la gravité des problèmes dont peut souffrir le patient en utilisant des méthodes de mesures efficaces et cohérentes. L'objectif de la recherche de la cause est d'identifier le maximum de facteurs favorisant ces dysfonctions de la mobilité. (6) (7) Identifier la cause de ces troubles aide à planifier une prise en charge et réadaptation la plus efficace possible. (6) Une évaluation de la mobilité basée sur des indices de performance (Tableau 1) peut être utilisée pour orienter vers la pathologie causale en association avec d'autres examens cliniques (dépistage de troubles cognitifs, etc.). Cette évaluation est effectuée en 4 étapes : (7)

- Anamnèse du patient, discussion sur ses plaintes, craintes et objectifs de marche
- Examen clinique : observation de la marche sans et/ou avec aide pour la marche (si le fait de marcher seul entraîne un danger pour le patient)
- Evaluation de la marche via l'utilisation d'indicateurs de performances (Tableau 1) et/ou de tests évaluant la mobilité
- Examen complémentaire/observation de la marche à nouveau avec les informations sur les différents composants de la marche du patient.

Tableau 1: Évaluation de la mobilité basée sur des indices de performance (7)

Composant	Signes	Score*	Signification clinique
Initiation de la marche (immédiatement après que l'on ait demandé de débiter la marche)	Toute hésitation ou nécessité de s'y reprendre en plusieurs tentatives pour démarrer	0	Maladie de Parkinson Incapacité isolée d'initiation de la marche (accident vasculaire cérébral ou démence) Trouble de la marche de type frontal
	Aucune hésitation	1	
Longueur et hauteur du pas à droite (balancement du pied droit)	Pied qui ne dépasse pas le pied d'appui gauche ou qui ne quitte pas le sol complètement lors du pas	0	Arthrites Problème podologique Accident vasculaire cérébral
	Dépasse le pied d'appui gauche	1	
	Quitte complètement le sol	1	
Longueur et hauteur du pas à gauche (balancement du pied gauche)	Pied qui ne dépasse pas le pied d'appui droit ou qui ne quitte pas le sol complètement lors du pas	0	Arthrites Problème podologique Accident vasculaire cérébral
	Dépasse le pied d'appui droit	1	
	Quitte complètement le sol	1	
Symétrie du pas	Longueur des pas droit et gauche non équivalente (estimé)	0	Unilatérale Déficit musculosquelettique ou neurologique focal
	Longueur des pas droit et gauche équivalente (estimé)	1	
Continuité du pas	Arrêt ou discontinuité entre les pas	0	Trouble de la marche de type frontal

			Peur de tomber, fréquente dans la démence
	Les pas apparaissent continus	1	
Trajectoire (estimée par rapport aux dalles sur le sol qui ont une largeur de 30 cm ; observation de la déviation de trajectoire des pieds durant une marche d'environ 3 m)	Déviations importante	0	Trouble de la marche de type frontal
	Déviations légère à modérée ou besoin d'une aide à la marche	1	
	Trajectoire rectiligne sans aide de marche	2	
Tronc	Balancement marqué ou utilisation d'une aide à la marche	0	Dysfonctionnement cérébelleux, sous-cortical et des noyaux gris centraux Démarche antalgique (arthrite de hanche ou de genou)
	Pas de balancement mais flexion des genoux, douleur rachidienne ou bras écartés tout en marchant	1	Peur de tomber
	Pas de balancement, pas de flexion, pas d'utilisation des bras et pas d'utilisation d'aide de marche	2	
Longueur de la foulée (ou du pas)	Talons écartés pendant la marche	0	Pathologie de hanche Pathologie cérébelleuse Hydrocéphalie à pression normale
	Les talons se touchant presque pendant la marche	1	
*Un score parfait est 12. Un score < 10 est habituellement associé à une limitation de la capacité à se mobiliser.			

2. Stratégie thérapeutique

À la suite de l'identification des troubles de la marche et de leur cause, une stratégie thérapeutique est mise en place pour prendre en charge le patient avec les options les plus adaptées selon la volonté du patient (ou de ses proches ou tuteurs légaux). La mise en place d'une stratégie de soins nécessite les connaissances et les compétences des différents corps de métiers médicaux et dans certains cas des services hospitaliers tels que les services de réadaptation. (24)

Dans un premier temps une prise en charge adaptée à la pathologie du patient est nécessaire. Par exemple dans le cas d'une lésion présumée de la moelle épinière, la prise en charge doit être rapide avec une évaluation de cette dernière, une immobilisation de la colonne vertébrale et une intervention chirurgicale. Un accès aux services de réadaptation est mis en place avec le suivi par des professionnels de santé pour permettre d'optimiser l'état fonctionnel, l'indépendance, le bien-être du patient et sa réintégration dans la société. (24)

Dans d'autres cas la stratégie thérapeutique peut nécessiter en premier lieu une prise en charge médicamenteuse du patient comme chez les patients atteints de sclérose en plaques ou de la maladie de Parkinson.

À la suite de la prise en charge de la pathologie causale, des soins de réadaptation sont mis en place pour traiter les troubles de la mobilité. Ce traitement peut passer par des séances de masso-kinésithérapie pour améliorer l'équilibre, la force musculaires, l'endurance musculosquelettique, la démarche et diminuer le risque de chute. (7) (14) Des programmes d'exercices physiques thérapeutiques avec des exercices proprioceptifs peuvent améliorer de manière significative la mobilité des personnes. Ces programmes peuvent être intéressants chez les personnes âgées institutionnalisées où les troubles de la mobilité sont très présents. Ces programmes de réadaptation sont de plus en plus nombreux avec les plans de prévention et de promotion de la santé chez les personnes âgées, selon des études ils ont amélioré de manière significative la mobilité et diminué le risque de chute. Une différence significative ($p < 0.05$) a été observée entre le groupe témoin (réadaptation classique) et le groupe expérimental (programme classique + exercices de proprioceptions), le score du test TUG était en moyenne de 22.50 pour le groupe témoin et 15.74 pour le groupe expérimental. Une différence significative ($p < 0.05$) intragroupe au sein du

groupe expérimental a également été observé avant et après le traitement passant d'un score de TUG de 20.68 en prétraitement à 15.74 en post-traitement.(14)

Les exercices proprioceptifs consistent à la réalisation d'exercices pour prendre conscience du corps, des mouvements possibles (passifs ou actifs) ou de la position des membres. (25) L'ajout de ces exercices aux exercices physiques permettent selon les conclusions d'études d'augmenter la coordination intra et intermusculaire, l'équilibre dynamique et de renforcer le traitement des informations envoyées au système nerveux central. (14)

En plus des exercices, la mobilité peut être améliorée grâce à l'utilisation de dispositifs médicaux (DMs) d'aides ou d'assistance à la mobilité. Ces DMs contribuent à la réadaptation en aidant les personnes à réaliser certaines actions liées à la mobilité telles que le transfert, la marche et affronter des obstacles via l'utilisation de béquilles pour franchir des escaliers, de scooters pour les déplacements en extérieurs, etc. (5) (7)

L'accès à ces dispositifs d'aide à la mobilité permettent aux patients d'entreprendre des activités de la vie quotidienne qui sans leur utilisation seraient difficiles. Ces DMs peuvent augmenter leur indépendance et réduire leurs limitations. (24) L'accès à ces DMs d'aide à la mobilité peut s'effectuer de différentes manières : via les hôpitaux, les centres de réadaptation, les centres d'éducation spécialisée ou auprès de prestataires privés. Ils peuvent être prescrits par différents professionnels de santé qui interviennent dans le parcours de prise en charge : le médecin généraliste, les masso-kinésithérapeutes, les ergothérapeutes, les médecins spécialistes, les orthésistes et prothésistes, etc. (3). Ils peuvent également pour certains DMs être achetés directement sans ordonnance par le patient lui-même ou ses proches avec le conseil des professionnels de santé tels que les pharmaciens pour orienter vers le DM le plus adapté aux besoins et à la morphologie de la personne.

B. Choix des dispositifs médicaux d'aide à la mobilité

Pour choisir un DM d'aide à la mobilité il faut d'abord comprendre leur intérêt.

1. Définition et intérêt des dispositifs d'aide à la mobilité

Les DMs d'aide à la mobilité sont considérés comme des dispositifs d'assistance selon la définition de l'OMS de 2011 « Une technologie d'assistance peut être définie comme « tout matériel ou produit obtenu dans le commerce, modifié ou personnalisé, et utilisé

pour accroître, maintenir ou améliorer les aptitudes fonctionnelles des personnes handicapées » ». (3)

En 2001 l'OMS a déterminé l'objectif des DMs d'aide à la mobilité comme « faciliter ou améliorer la mobilité personnelle de leurs utilisateurs, en d'autres termes, leur aptitude à changer de position, maintenir une position, marcher et se déplacer seul d'un point à un autre ». (3)

Les DMs d'assistance à la mobilité ont donc pour indication les personnes ayants des troubles de la mobilité (personnes âgées, les personnes avec une pathologie sous-jacente). Selon des études, lorsque le dispositif est adapté au patient et au contexte d'utilisation, une amélioration significative du degré d'autonomie et de participation sociale (via la création d'opportunités professionnelles et éducatives) est observée chez les personnes handicapées. Des patients atteints de tétraplégie sont plus susceptibles d'avoir un niveau d'éducation plus élevé lorsque leur dispositif d'assistance (fauteuil roulant) est adapté à leurs besoins (P= 0.003). (3) (26) Ce type de DM a donc un grand intérêt s'il est adapté au patient pour aider à améliorer sa santé (empêcher l'aggravation des troubles de mobilité, éviter les chutes et traumatismes, ...), sa qualité de vie et à retrouver une certaine indépendance. (3)

En plus d'avoir un intérêt au niveau individuel pour le patient, les DMs d'aide à la mobilité peuvent contribuer à d'augmenter la productivité et réduire les dépenses en santé. (3)

2. Choix du DM le plus adapté au patient

Même si ces DMs peuvent être disponibles en accès libre (pharmacie, magasin spécialisé, vente en ligne, etc.), l'idéal est qu'il soit prescrit ou au moins conseillé par un professionnel de santé ayant connaissance de l'anamnèse médicale du patient pour déterminer le DM le plus adapté. Le choix du DM d'assistance dépend de nombreux facteurs tels que l'âge du patient, sa ou ses pathologie(s) existante(s), son environnement de vie, si le patient est entouré ou non, etc.

Même s'il n'existe pas de réel guide pour les praticiens pour estimer quel est le DM approprié pour leur patient, l'OMS dans son document intitulé « Document de synthèse conjoint sur la fourniture de dispositifs d'aide à la mobilité dans les régions » propose 5 principes applicables à la fourniture de dispositifs d'aide à la mobilité, qui sont les suivants : (3)

- Acceptabilité : les patients doivent participer de manière active au choix du DM. L'acceptabilité peut dépendre de nombreux facteurs qui doivent être pris en compte dans la proposition du modèle/type de dispositif. Ces facteurs sont l'efficacité, la fiabilité, la simplicité, la sécurité et l'esthétique.
- Accessibilité : les DMs d'assistance à la mobilité doivent être accessibles à toutes les personnes qui en ont la nécessité sans aucune discrimination. Une information claire doit être fournie. Les DMs d'aide à la mobilité doivent avoir un tarif abordable pour les personnes souffrant de troubles de la mobilité. Le degré d'accessibilité économique est fortement dépendant de la zone géographique où vit le patient.
- Adaptabilité : Les DMs doivent répondre aux besoins des patients et prendre en compte toutes les pathologies dont peut souffrir ce dernier : déficiences physiques et/ou cognitives, l'environnement de vie, sexe, âge, mode de vie, ...
- Disponibilité : Les ressources nécessaires pour fournir le DM (établissement et services de soins, programmes, professionnels de santé, produits, ...) doivent être disponibles en quantité suffisante pour couvrir les besoins du patient.
- Qualité : Les ressources nécessaires doivent être de qualité appropriée ainsi que les DMs eux-mêmes. Ces derniers peuvent voir leur qualité évaluée à l'aide de normes, directives et réglementation tel que le marquage CE.

Le professionnel de santé doit donc fournir à son patient souffrant de troubles de la mobilité un DM adapté à sa situation, qui soit disponible avec les ressources nécessaires à son utilisation (apprentissage à son utilisation, personnel aidant, etc.). Le DM doit également être d'une certaine qualité et finalement être accepté par le patient lui-même et non imposé.

IV. DISPOSITIFS MEDICAUX D'AIDE A LA MOBILITE

Les DMs d'aide à la mobilité sont parmi les DMs d'assistance les plus nombreux. (3)

A. Exemples de dispositifs existants

Il existe différentes sortes de DMs pour aider à la prise en charge des troubles de la mobilité. Ils ont pour but de garantir dans la mesure du possible la mobilité et l'autonomie des personnes ayant un handicap. Les dispositifs les plus couramment utilisés dans la prise en charge des difficultés à la mobilité sont listés ci-dessous. (3) (27)

- Pour aider aux déplacements : les fauteuils roulants manuels ou électriques, les béquilles, cannes, cannes blanches (en cas de cécité), déambulateurs (fixes ou avec roues), les tricycles, scooters, orthèses, prothèses des membres inférieurs, etc.
- Pour aider à changer ou conserver une position : les appareils de transfert, les appareils de verticalisation, les lits électriques, etc.
- Pour aider à manipuler des objets et effectuer certains gestes qui peuvent aider à leur déplacement : prothèse des membres supérieurs, etc.

Voici ci-dessous une présentation non exhaustive de dispositifs présents sur le marché et couramment utilisés chez les patients atteints de difficulté ou d'incapacité à la mobilité.

1. Les cannes

La canne ayant pour nom à l'origine la canne anglaise fut brevetée par le français Emile Schlick en 1915 en tant que canne de soutien. (27) Une canne peut être définie comme « un bâton léger sur lequel on peut s'appuyer pour marcher » dérivant vers le sens de « bâton de promenade » aux XVII^{ème} siècle. (27) Les cannes avec les béquilles et les déambulateurs sont des DMs qui vont supporter le poids du corps du patient et peuvent permettre de maintenir leur équilibre en sécurisant leur appui. (27) (28) (*Figure 7*)

Les cannes sont utilisées de manière ponctuelle par le patient quand il en ressent le besoin ou de manière permanente. (27) Les cannes sont utilisées dans le cas de douleur arthrosique (du genou ou de la hanche), de neuropathie périphérique, à la suite d'une opération, après une chute, ou du fait de l'âge avancé de la personne. Elles

seront utilisées du côté opposé à la jambe/pied douloureux ou ayant une faiblesse. (7)
(27)



Figure 7: Exemple de canne (29)

Les cannes ne sont pas les dispositifs d'assistance apportant le plus de stabilité au patient mais leur octroi le plus de liberté et de vitesse de marche comparées aux béquilles et aux déambulateurs. Elles permettent d'avoir une main libre pour prendre des objets ou réaliser des actions de la vie quotidienne (Tableau 2). (7) (28)

Tableau 2: Tableau comparateur d'aides à la déambulation (28)

Caractéristiques	Déambulateur	Béquilles	Cannes
Stabilité	Très bonne	Bon	Moins stable
Vitesse de marche	La plus lente	Lente	Peut être rapide
Utilisation sur des marches	Aucun	Entraînement nécessaire	Facile
Force du bras nécessaire pour l'utilisation	Normale	Force modérée	Normale
Nombre de mains nécessaire pour l'utilisation	2	Habituellement 2	Habituellement 1
Possibilité de porter des objets	Nécessite l'attachement du panier	Aucun	Possible
Coût	Très coûteux	Relativement peu coûteuses	Moins coûteuses

Les cannes existent dans différents modèles. L'aspect esthétique peut varier d'un modèle à l'autre (forme, couleur, matière, etc.). Elles peuvent être simples, pliables, réglables, peuvent reposer sur un seul manche ou être tripode voir pour certaines quadripodes. Les cannes peuvent être réglables notamment au niveau de la taille. La taille idéale d'une canne est atteinte lorsque le patient a son coude fléchi entre 20 et 30° quand il tient la canne. (7) Ces dispositifs sont accessibles sur ordonnance mais également en vente libre en officine ou sur internet. La canne devant être ajustée pour avoir une meilleure adaptation à la taille du patient, l'idéal est de se fournir en officine plutôt que par internet. (7)

Une catégorie particulière de canne a été inventée pour les personnes mal ou non voyantes : les cannes blanches (Figure 8). Ce type de canne permet de détecter la présence d'obstacle dans l'environnement. Il existe deux hypothèses concernant son origine : la première est qu'elle fut inventée en 1930 par la française Guilly d'Herbemont, la seconde hypothèse attribut son invention à James Briggs en 1921. (27)



Figure 8: Exemple de canne blanche (30)

La canne blanche connue actuellement a été développée par le Dr Richard Hoover après la seconde guerre mondiale. Il a amélioré le modèle d'origine en travaillant sur la longueur de la canne et sur son utilisation lors du déplacement des patients.

2. Les déambulateurs

Les déambulateurs (Figure 9) auraient été inventés dans les années 1940 et améliorés par la suédoise Aina Wifalk dans les années 1970. (27) Comme indiqué dans le paragraphe précédent, les déambulateurs sont des DMs qui soutiennent le patient durant la marche en leur offrant un point d'appui et un certain équilibre, facilitant ainsi

leur déplacement. (27) (28) Les déambulateurs permettent de réduire la douleur chez les personnes souffrant d'arthrose, ou sont utilisés du fait de l'âge avancé de la personne. (7)

Par rapport aux cannes, les déambulateurs offrent une plus grande stabilité mais ralentissent fortement la vitesse de marche et nécessitent l'utilisation des deux mains. Contrairement aux cannes, tous les modèles de déambulateurs ne peuvent pas être utilisés dans des marches ou en milieu extérieur. (27) (28)



Figure 9: Modèles de déambulateurs (27)

Il existe deux modèles de déambulateurs (7) (27):

- Les déambulateurs type « cadre de marche ». Leur utilisation est recommandée uniquement en intérieur. Ce modèle nécessite une certaine force dans le haut du corps, limitant ainsi les utilisateurs éligibles.
- Les déambulateurs type « rollator » qui disposent de roues, permettent de réduire les efforts nécessaires pour avancer et d'augmenter la vitesse de marche. Par rapport au modèle cadre de marche, la stabilité de ce modèle est plus faible. Pour ce modèle un système autobloquant est présent au niveau des roues pour empêcher le déambulateur de partir en arrière risquant d'engendrer la chute du patient utilisant ce DM. Selon son nombre de roue (2, 3 ou 4) ce modèle peut être utilisé en extérieur.

Au niveau de son aspect un déambulateur est composé d'un cadre métallique qui diminue le risque de chute vers l'avant. Sur ce cadre se trouve des poignets, au niveau des pieds se trouvent des embouts antidérapants quand le déambulateur n'est pas doté de roues. Certains modèles peuvent être pourvus d'une assise, et d'accessoires

tel que des paniers. Le déambulateur se règle au niveau de sa hauteur pour s'adapter à la taille de l'utilisateur. (7) (27) Tout comme les cannes, les déambulateurs peuvent être prescrits par un médecin ou acheter en vente libre via les officines, les vendeurs spécialisés ou sur internet. (7)

3. Fauteuils roulants

Les fauteuils roulants peuvent être séparés en 2 catégories : les fauteuils roulants manuels et les fauteuils roulants électriques. (27)

Le fauteuil roulant manuel trouve son origine en Chine en 525. Le premier fauteuil roulant pliable a été inventé en 1933 par Everest et Jennings. (27)

Le premier fauteuil électrique a été mis au point en 1950 au Canada et importé en France en 1973. (27)



Figure 10: Modèles de fauteuils roulants (27)

Les fauteuils roulants sont composés pour les deux modèles d'un châssis en aluminium ou en carbone, d'un dossier, d'une assise et de trois roues au minimum (Figure 10).

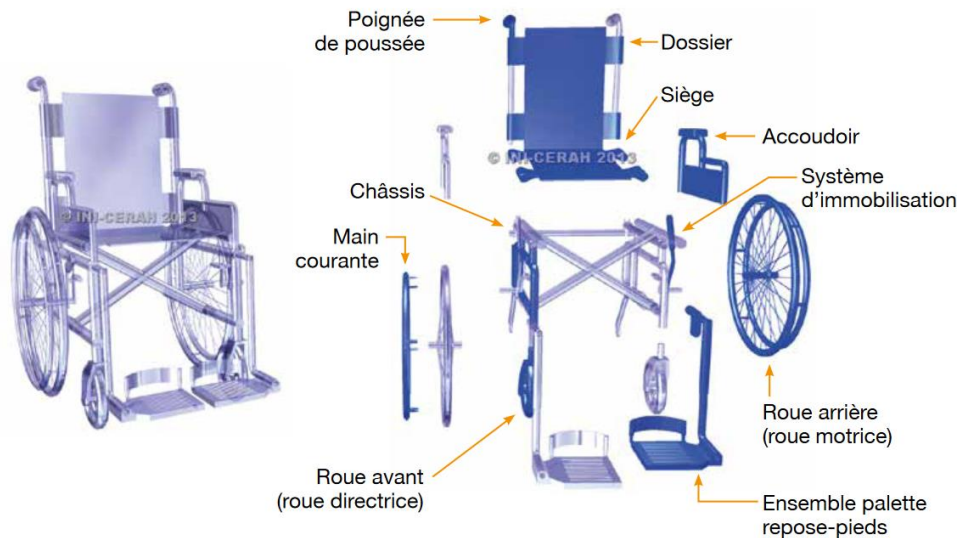


Figure 11: Structure d'un fauteuil roulant manuel (31)

Les fauteuils roulants manuels sont composés de deux roues motrices (une à l'avant et une à l'arrière) avec une main courante pour permettre la propulsion grâce aux mains de l'utilisateur. (Figure 11) (31) Les fauteuils manuels vont varier d'un modèle à l'autre par le châssis, les dimensions (standard mais existant aussi sur mesure), l'assise, le dossier, les repose-pieds, la présence ou non d'accessoires (freins, mains courantes, type de roues, etc.), ainsi que le mode de propulsion (avec les bras, les jambes ou les deux). (27) (31) Des fauteuils roulants manuels adaptés à la pratique du sport furent inventés dans le cadre de la pratique amateur ou professionnelle. Ce type de fauteuil est adapté au sport pratiqué. Une modification de la carrosserie est réalisée pour le tennis, la taille et l'inclinaison des roues pour le basketball, la présence d'un pare-chocs à l'avant du fauteuil pour le football. (27) (28)

Les fauteuils électriques ont la même base que les modèles manuels (châssis et assise/dossier) mais disposent (Figure 12) d'un moteur entraînant une propulsion ainsi que d'une manette ou module permettant de contrôler la direction du fauteuil. La manette peut être adaptée à la pathologie de l'utilisateur (commande au menton, au pied occipitale, etc.). Une des autres différences avec un fauteuil manuel est la taille des roues motrices qui sont plus petites sur un fauteuil électrique. (27) (28) (32) Les modèles électriques assurent une meilleure stabilité que les modèles manuels sur un terrain régulier et permettent de monter et descendre les trottoirs avec plus de facilité. (28)

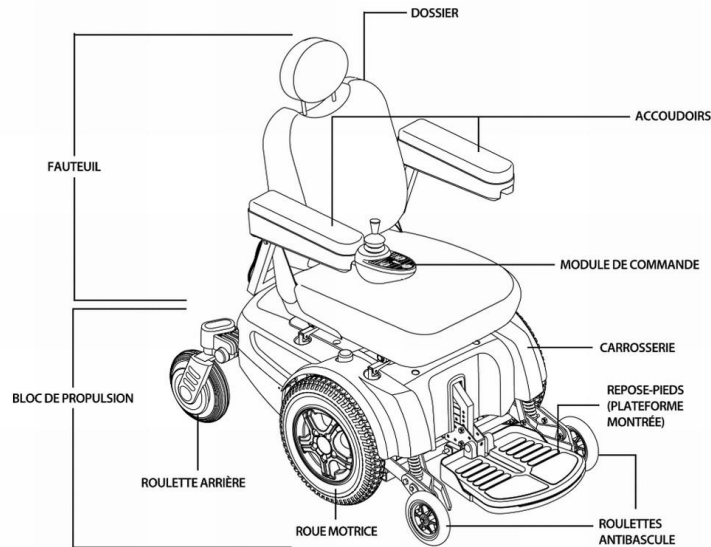


Figure 12: Structure d'un fauteuil roulant électrique (32)

Les fauteuils roulants, qu'ils soient manuels ou électriques, permettent aux personnes qui ne peuvent plus se déplacer de manière temporaire ou définitive de retrouver une autonomie et d'améliorer leur qualité de vie. Le modèle électrique contrairement au manuel va pouvoir être utilisé par des patients atteints de pathologies pouvant être très handicapantes au niveau de la mobilité tel que la tétraplégie, l'insuffisance respiratoire chronique avancée ou la sclérose en plaque dans un stade avancé. (27) (28)

Un fauteuil roulant peut directement être utilisé par les patients ou avec l'aide d'une tierce personne. On considère qu'environ 2 à 3% de la population française utilise un fauteuil roulant avec une moyenne d'âge de 70 ans. (27)

Les scooters de mobilité sont des dispositifs médicaux qui peuvent être catégorisés comme fauteuils roulants électriques. Ils sont guidés par un volant ou une barre à la place du module de commande (Figure 13). Ce sont des dispositifs d'assistance utilisés chez des personnes pouvant se déplacer sur de courtes distances mais en incapacité de marcher sur des distances moyennes ou longues. (28)



Figure 13: Exemple de scooter de mobilité (33)

4. Prothèses

Les prothèses (Figure 14) sont des dispositifs d'assistance destinés à remplacer un membre à la suite d'une amputation pour récupérer une partie des fonctions qui étaient perdues, tel que la marche pour les prothèses de membres inférieurs. Il est estimé que chaque année il y a 8 300 à 9 000 nouveaux amputés des membres inférieurs en France. (27) (28)

Les prothèses sont des DMs qui permettent à l'utilisateur de retrouver son autonomie en améliorant sa qualité de vie. On peut classer les prothèses dans deux grandes catégories : les prothèses des membres inférieurs et les prothèses des membres supérieurs. (27) Dans le cadre de cette thèse nous allons nous concentrer sur les prothèses de membres inférieurs qui ont un impact sur la mobilité des personnes.

Les prothèses de membres inférieurs sont des dispositifs très anciens. Les premiers modèles retrouvés dateraient de l'an - 3 000 et de l'époque de l'Égypte antique où ces prothèses avaient un rôle plus esthétique que d'assistance à la mobilité. Une des premières grandes évolutions fut la création par Ambroise Paré en 1564 d'une prothèse pouvant se fléchir au niveau du "genou". Les évolutions techniques au niveau des prothèses sont dues aux différentes guerres à travers l'histoire et en particulier les deux guerres mondiales qui ont accéléré et amélioré la prise en charge des personnes amputées des membres inférieurs. (27)



Figure 14: Exemples de prothèses de membre inférieur (34)

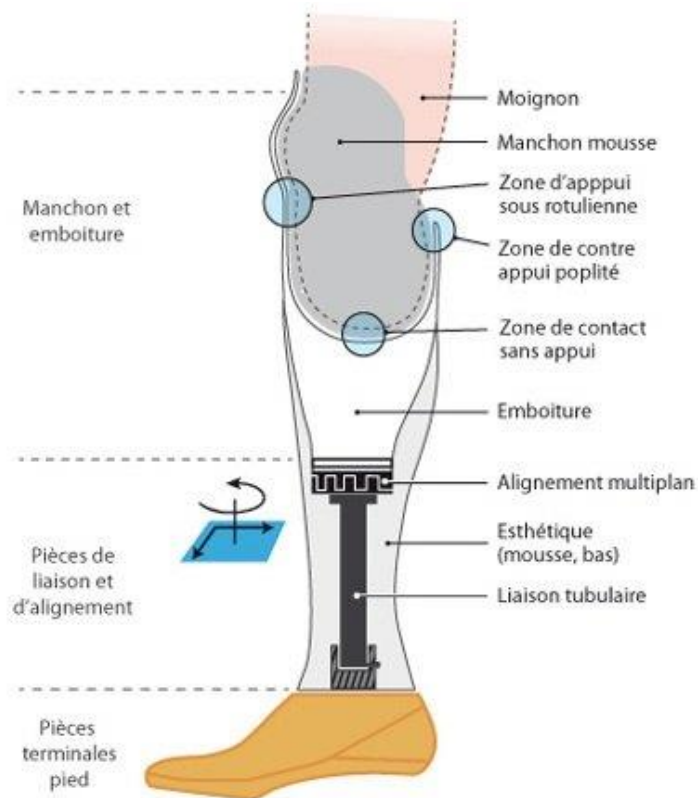


Figure 15: Schéma d'une prothèse de membre inférieur (35)

Une prothèse est composée de différents éléments (Figure 15) (27):

- Un manchon, qui est inséré dans l'emboiture via un système de ventouse, de clip ou d'une gaine de suspension.

- Une emboiture : c'est l'interface entre le moignon du patient et la prothèse. Sa composition va dépendre du stade de l'amputation : lorsque l'amputation est récente l'emboiture sera composée de plâtre pour permettre d'avoir une contention autour du moignon puis quand le patient sera dans la phase de rééducation l'emboiture sera thermoformée et lorsque le moignon aura atteint son volume finale l'emboiture définitive sera installée et sera composée de fibre de carbone ou de verre avec de la résine.
- Éléments intermédiaires (tubes, composés permettant l'alignement, etc.).
- Effecteur terminale ou pied, qui permet le contact avec le sol.

Il existe différents aspects au niveau des prothèses (Figure 14) ; certaines ressemblent aux membres naturels, alors que d'autres laissent apparaître les éléments composant la prothèse comme le manchon, les tubes, etc. Certaines prothèses peuvent avoir une personnalisation esthétique au niveau du manchon tel qu'une illustration. (28)

Les prothèses de membres inférieurs comprennent différents types de prothèses permettant de compenser différents degrés d'amputation. (27)

Les prothèses de pieds doivent supporter le poids du corps du patient, elles sont donc disponibles pour différentes corpulences mais également dans des tailles différentes pour adapter la prothèse à la pointure du pied restant de la personne. (Figure 16) Sa composition est variable : bois, polyuréthane, fibre composite, etc. La prothèse peut également être fendue en 2 pour augmenter sa capacité de déformation face aux contraintes pouvant être exercées dessus ou être à restitution d'énergie. (Figure 16) (27) Comme toute prothèse de membre inférieur le modèle de prothèse dépend des besoins de la personne. Par exemple pour un patient étant peu actif la prothèse sera plus rigide que les personnes devant piétiner au quotidien. (27)



Figure 16: Modèle de prothèse de pied (27)

Les prothèses tibiales sont prescrites pour les amputations se situant sous le genou du patient. Leur composition va dépendre du poids de la personne : aluminium pour les patients légers sinon un alliage de titane ou de l'acier. (27)

Les prothèses fémorales sont prescrites pour les amputations se situant au-dessus du genou du patient. Ce type de prothèse reproduit le genou (carbone, aluminium, titane ou plastique) en imitant ce dernier pour permettre la marche. Le fonctionnement de ce genou artificiel est soit mécanique soit électronique. Le mouvement de la jambe prothétique est initié par le patient, avec la cinétique et le mouvement du corps le genou prothétique va réaliser les mouvements de flexions/extensions nécessaires à la mobilité du patient. (27) Pour ce modèle de prothèse des "accessoires" de sécurité peuvent exister notamment pour les personnes âgées tels que des verrous ou un système de régulation plus sécuritaire (verrouillage/déverrouillage du système de flexion extension du genou). Des systèmes d'intelligence artificielle peuvent être intégrés via des microprocesseurs pour les personnes les plus actives permettant un système de régulation plus souple. (27)

Tout comme pour les fauteuils roulants, il existe des prothèses spécifiques à la pratique du sport telles que des prothèses pour la course où la prothèse a une forme particulière dite de "lame" qui à la suite de sa déformation va restituer de l'énergie. (27) Des prothèses pouvant être immergées dans l'eau ont également été conçues avec une emboîture spécifique et une résistance à l'eau salée. (27)

Contrairement aux DMs vu précédemment, les prothèses ne peuvent être obtenues que via une prescription médicale. (27) Pour pouvoir avoir une prothèse le patient doit consulter un orthoprothésiste qui va orienter le patient vers la meilleure option pour satisfaire ses besoins. Les prothèses sont personnalisées et adaptées à chaque patient par l'orthoprothésiste qui est le seul professionnel de santé ayant l'agrément de fournir ce type d'assistance à la mobilité. Un suivi par un kinésithérapeute doit être instauré avant l'obtention de la prothèse et continuer jusqu'à ce que le patient puisse correctement utiliser sa prothèse et qu'il se soit adapté à cette dernière. (27) (28) Certains patients ne tolèrent pas la présence d'une prothèse ou ne peuvent terminer le parcours de rééducation nécessaire à l'adaptation et utilisation de ce type de DM. (28)

B. Dispositifs innovants d'aide à la mobilité

Pour pouvoir déterminer si les DMs d'aide à la mobilité sont « innovants », il faut dans un premier temps comprendre ce qu'est l'innovation dans le domaine des DMs.

1. Définition de dispositif innovant

L'innovation a été décrite par l'OCDE dans le manuel d'Oslo comme « la mise en œuvre d'un produit (bien ou service) ou d'un procédé nouveau ou sensiblement amélioré, d'une nouvelle méthode de commercialisation ou d'une nouvelle méthode organisationnelle dans les pratiques de l'entreprise, l'organisation du lieu de travail ou les relations extérieures. ». Cette définition a permis de dégager 4 catégories d'innovation : (36)

- Les innovations de produit
- Les innovations de procédé
- Les innovations de commercialisation
- Les innovations d'organisation

Les DMs de manière globale sont concernés par l'innovation de produits ou de procédés (par l'amélioration d'un procédé chirurgical par exemple). Au niveau des innovations médicales, selon l'article R165-63 du CSS du 19 février 2015 un produit de santé ou acte médical est considéré comme innovant quand il répond à 4 critères qui sont : (37)

- Un caractère de nouveauté autre qu'une simple évolution technique
- Le dispositif doit apporter un bénéfice clinique et/ou médico-économique
- Les risques sont maîtrisés
- Des études cliniques et/ou médico-économique de suivi sont disponibles et doivent être légitime au regard des données cliniques disponibles :
 - Le DM doit apporter un bénéfice clinique important en termes d'effet thérapeutique, diagnostique ou pronostique, permettant de satisfaire un besoin médical non couvert ou insuffisamment couvert ;
 - Réduire les dépenses de santé, du fait d'un bénéfice médico-économique apprécié en termes d'efficacité ou d'impact budgétaire sur le coût de la prise en charge.

La HAS va apporter des précisions à la définition et aux critères du CSS. Elle détermine qu'un DM est susceptible d'être innovant s'il « présente un caractère de

nouveauté autre qu'une simple évolution technique au regard des technologies de santé utilisées dans l'indication revendiquée ». (38) Cette notion de caractère de nouveauté a été précisée comme : (39)

- Une nouvelle technologie
- Un nouveau mode d'action transformant la prise en charge d'une pathologie ou d'un handicap
- Une transformation radicale d'un acte professionnel pour l'usage d'un dispositif déjà existant
- Une transformation radicale du système d'organisation des soins associés à une pathologie ou un handicap
- L'introduction d'une nouvelle technologie dans une classe existante.

L'innovation dans le domaine médical n'est pas seulement une innovation technologique du produit de santé, cela englobe également une innovation dans les usages et dans la prise en charge des patients. Outre les évolutions techniques, l'impact du nouveau DM doit être estimé dans sa globalité : amélioration de la vie du patient, de son espérance de vie, de la technique d'opération, de la diminution du coût des soins, etc, en utilisant certains indicateurs comme la balance bénéfice/risque du DM, l'analyse médico-économique, le bilan énergétique du produit, son accessibilité notamment dans les pays en voie de développement, sa possible réutilisation, etc.

Durant les dernières années de nombreuses avancées en termes de prises en charge des difficultés de la mobilité en termes de DMs ont eu lieu, dont certaines peuvent être considérées comme des innovations dans le domaine médical. La prise en charge des troubles de la mobilité est en constante évolution avec l'amélioration de dispositifs existants ou la création de nouveaux dispositifs.

2. Exemples d'innovation dans l'assistance à la mobilité

L'innovation est un phénomène continu qui ne cesse d'évoluer au cours du temps dans de nombreux domaines dont l'amélioration de la prise en charge des troubles de la mobilité. Le but est de permettre à certains patients de retrouver une partie ou la totalité de leur mobilité et d'améliorer leur qualité de vie et leur confort, ce qui n'est pas forcément le cas avec les DMs présents sur le marché. L'innovation dans les DMs

d'assistance à la mobilité va se situer principalement dans deux grandes catégories d'innovation :

- L'amélioration de DMs déjà existants avec l'aide de nouvelles technologies
- La création de nouveaux DM changeant la prise en charge possible du patient.

Voici ci-dessous une présentation non exhaustive de dispositifs innovants d'aide à la marche qui émergent depuis quelques années.

a. Amélioration de dispositifs existants

Comme évoqué précédemment, l'innovation peut passer par la modification et l'amélioration de DMs déjà présents sur le marché. Ces modifications peuvent avoir plusieurs aspects en passant par la conception (matériaux, ...) du dispositif, le mode de fonctionnement ou le changement d'indication/cible médicale du dispositif.

i. Utilisation de technologies existantes

L'utilisation d'une technologie existante qui n'est pas spécifiquement utilisée pour l'aide à la mobilité ou le changement d'indication médicale peut être une source d'innovation notamment dans le cadre de la prise en charge des troubles de la mobilité.

Ce cas de figure s'est notamment vu avec l'utilisation de stimulation électrique épидurale (EES). L'EES est à l'origine utilisée pour soulager la douleur des patients en mettant des électrodes au niveau des racines dorsales de la colonne vertébrale. Dans de récentes recherches, il a été démontré qu'en ciblant les racines dorsales impliquées dans les mouvements du tronc et des membres inférieurs et en recrutant des fibres nerveuses de grands diamètres, il pouvait être possible de restaurer diverses fonctions motrices en activant un ensemble de motoneurones. (40) Grâce à l'utilisation d'un dispositif composé d'un générateur d'impulsion avec des électrodes, des patients avec une paralysie motrice complète, dont un avec une section de la moelle épinière, ont été capable de remarcher après plusieurs mois d'entraînement et d'utilisation de ce dispositif. En Suisse, trois patients souffrant de paralysie sensorimotrice complète ont pu grâce à l'utilisation de l'EES et une rééducation se tenir debout, marcher ainsi que récupérer la capacité de pouvoir faire du vélo et nager. Dès le premier jour de l'utilisation du dispositif ces trois patients pouvaient remarcher de manière indépendante (jusque 300 pas effectués), au bout de 5 mois de neuroréhabilitation la mobilité des patients s'est améliorée de manière significative. (40)

ii. Modification de la conception d'un DM

L'innovation peut être appliquée à des dispositifs existants en modifiant la conception de ces derniers. Cela peut passer par la modification de la structure d'un dispositif comme pour le Re-Link Trainer (the University of Auckland) (Figure 17) utilisé pour la rééducation des patients en phase aigüe post-AVC. C'est un dispositif basé sur un déambulateur disponible sur le marché (Pacer Gait Trainer, Rifton USA) dont le cadre a été modifié pour créer une liaison à 4 barres ajoutant une contrainte sur le membre déficient. Lors de la marche le dispositif déplace le membre déficient sur une trajectoire prédéfinie grâce à une plaque sur laquelle la jambe est attachée par des bandes de Velcro® au niveau de la cheville permettant de garder la liberté de mouvement de la hanche et de flexion du genou. (41)



Figure 17: Re-Link Trainer (41)

La modification de dispositifs existants peut également passer par l'ajout de technologies récentes telles que des éléments numériques. Un exemple est l'ajout d'un boîtier électronique sur un déambulateur permettant de passer d'un déambulateur conventionnel à un déambulateur numérique disposant de différents systèmes d'assistances techniques tels que l'appel à l'aide ou la détection des chutes. Il dispose également d'un boîtier vocal qui informe l'utilisateur de certains événements ou situations comme le risque de chute. Il dispose également d'un système d'éclairage de trottoir. Ces assistances techniques augmentent le sentiment de sécurité des utilisateurs qui peuvent être plus disposés à se déplacer. Ce système aurait pour effet d'augmenter l'autonomie et la qualité de vie des utilisateurs. (42) Le boîtier

électronique fonctionne grâce à une batterie qui nécessite une charge tous les 3 à 7 jours selon l'utilisation du DM. (42)

L'innovation impacte aussi la conception des prothèses avec le développement de prothèse robotiques/bioniques qui reproduisent la biomécanique de la jambe en particulier des articulations. Ces modifications permettent d'améliorer la capacité de déambulation des patients, de s'adapter à différentes vitesses de marche de manière comparable à un membre biologique, de diminuer le coût métabolique par rapport à une prothèse passive. (43) (44) (45)



Figure 18: Schéma d'une prothèse de jambe robotique (43)

Ces prothèses biomécaniques reproduisent les éléments clés de la jambe grâce à des systèmes d'actionnements (pneumatique, élastiques en série), de capteurs, d'alimentation électrique embarquée, et de moteurs. (Figure 18) (43) (45) Les capteurs à l'intérieur de la prothèse vont permettre de mesurer l'amplitude et la puissance délivrée pendant la marche pour ajuster les mouvements de la prothèse et ainsi s'adapter au mouvement du membre biologique. (45) Un exemple de ce type de prothèse est l'Utah Bionic Leg (Ottobock) qui permet des amplitudes de mouvements suffisants pour permettre au patient de descendre les escaliers tout en plaçant le pied de manière précise sur la marche, ce qui peut être difficile avec une prothèse conventionnelle. (43)

La conception des prothèses a été modifiée pour passer à des prothèses robotiques avec alignement actif. Ces prothèses utilisent un mécanisme permettant d'injecter une puissance positive dans le cycle de marche pour réduire la charge sur le membre résiduel en augmentant les forces de réactions au sol du côté de la prothèse et d'améliorer la symétrie de marche du patient. La prothèse est alignée en continu permettant de réduire de 10% les pressions maximales associées au membre résiduel. Lors d'une étude, les patients ont ressentis une plus grande facilité de marché avec ce type de prothèse robotique avec alignement actif qu'avec une prothèse conventionnel et leur endurance avait augmenté. (44)

L'utilisation de prothèses biomécaniques et robotiques nécessite de bien comprendre, comme pour toute prothèse, les spécificités de chaque patient et elle nécessite une formation spécifique pour son utilisation. (46)

Une autre modification peut être celle de la méthode de fabrication en utilisant des technologies récentes telles que l'impression 3D dans le but d'imprimer une prothèse de membre inférieur. Une prothèse imprimée en 3D a été développée et approuvée par la FDA pour un usage dans l'eau (piscine) en utilisant un matériau amphibie (nylon renforcé par de la fibre de carbone) et avec des micro-trous de forme conique créant une trainée et propulsion dans l'eau. Cette prothèse permet une plus grande facilité à la pratique de la natation et des activités d'eau. Cette prothèse peut être utilisée sur terrain humide et terrain sec, contrairement aux prothèses de natation classique qui ne peuvent être utilisées que dans l'eau, facilitant ainsi la transition entre la natation et la réalisation d'autres activités. Elle présente un dernier avantage qui est son faible coût comparé aux prothèses de natation classique. (47)

iii. [Rétroaction sensorielle](#)

La rétroaction sensorielle ou biologique est une technique de rééducation basée sur la bioélectricité pour contrôler des fonctions organiques telles que la tension musculaire ou le rythme cardiaque, en se basant sur la visualisation des signaux physiologiques dont la personne a conscience. Cette technologie est implémentée dans certains DMs existants pour améliorer leur résultat sur la mobilité des patients.

Une des méthodes de rétroaction sensorielle utilisée dans la mobilité est la rétroaction vibrotactile qui peut être implémentée dans les prothèses de membre inférieur. (48) Cette rétroaction vibrotactile peut être utilisée dans les prothèses pour améliorer la

perception du placement du pied dans les escaliers qui est réduite chez les patients amputés. Cette technique peut être ajoutée sur une prothèse avec un dispositif de rétroaction haptique sur la cuisse qui va fournir des signaux vibrotactiles sur le placement du pied par rapport aux marches d'escalier. (48) Une étude a démontré que lors de la descente des escaliers l'utilisation d'un système vibrotactile améliore la performance de descente des escaliers. L'utilisation du système vibrotactile augmente la précision du placement du pied de 17.5% jusque 20% pour certains patients. Ces résultats sont prometteurs pour augmenter la qualité de vie et l'autonomie des patients porteurs de prothèses de membres inférieurs et dans le cadre du développement de prothèses de membres inférieurs à intégration sensorielle. (48)

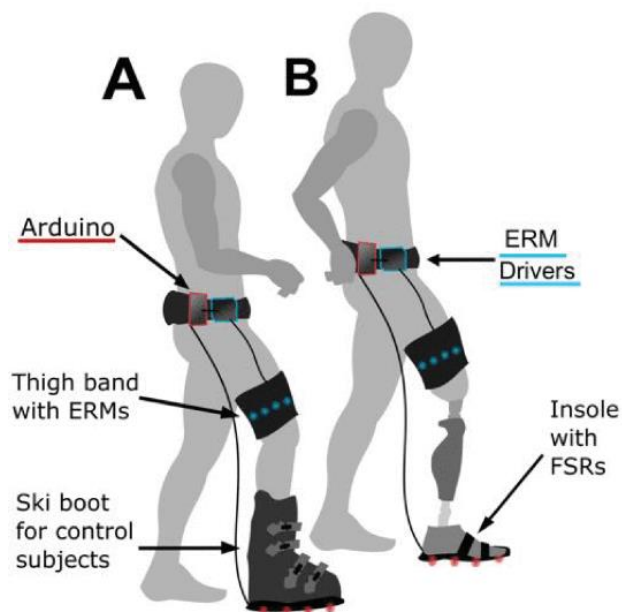


Figure 19: Exemple de modèle de DM de rétroaction sensorielle (48)

Ce dispositif de rétroaction sensorielle est composé d'une semelle intérieure avec des capteurs de force et des moteurs émettant des vibrations au niveau de la cuisse. Les éléments électroniques sont contenus dans un sac porté au niveau de la ceinture par le patient. (Figure 19) (48)

La rétroaction sensorielle peut également être utilisée pour améliorer l'équilibre des personnes portant une prothèse en intégrant un système de retour sensoriel dans la prothèse. Des vibrations mécaniques sont administrées au niveau des tendons et des muscles d'un membre grâce à des capteurs et un actionneur portable pour induire la perception du mouvement détecté. (49) Pour réaliser cette rétroaction sensorielle, les

recherches se concentrent sur le développement d'une prothèse contrôlée par un microprocesseur reposant sur des unités inertielles permettant de surveiller les mouvements de la prothèse et améliorer ses performances, mais également d'acquérir des données sur ses mouvements. Le système par microprocesseur devrait être capable de piloter l'actionneur vibratoire dans le cadre de la rétroaction. L'activation serait enclenchée par la détection du mouvement sur l'axe robotique de la prothèse et la communication sans fil des données de ce mouvement. (49) Toutefois, l'utilisation de ce type de technologie dépend de la qualité des tendons et des muscles du membre perdu qui peuvent être trop abîmés, inaccessibles ou totalement absents. (49)

iv. Stimulation électrique et contrôle neuromusculaire

Une des autres voies d'amélioration est celle de la stimulation électrique fonctionnelle (FES) qui est une technique qui va permettre de produire des mouvements fonctionnels lors d'un remplacement de membre ou lorsque les muscles ont un contrôle moteur altéré. Des décharges électriques sont appliquées au niveau du muscle du patient pour permettre leur contraction au moment souhaité et ainsi d'assister les mouvements fonctionnels qui sont ciblés.(50) (51)

La stimulation électrique/myoélectrique peut au niveau du muscle détecter l'angle et la vitesse du mouvement de la jambe/moignon et déclencher une stimulation personnalisée pour la dorsiflexion. Cette stimulation se fait au moment approprié du cycle de marche pour favoriser une démarche normale. Via cette méthode la fonction des membres inférieurs peut être restaurée avec une assistance robotique.(52) (53)

L'utilisation de la FES nécessite une personnalisation de la stimulation (moment de réalisation et intensité) pour chaque patient pour permettre d'actionner le mouvement. Cette méthode dépend fortement de l'emplacement des électrodes, et des capacités restantes du patient dans la réalisation du contrôle volontaire. (53)

De nombreuses applications de cette technologie sont étudiées notamment dans le cadre de neuroprothèses. Ces neuroprothèses utilisant la FES sont composées d'électrodes (de surface, percutanées ou implantées) qui vont délivrer la stimulation électrique et de capteurs pour le contrôle de la stimulation par le patient ou de manière automatique par la prothèse. (50) (52) (53) Différentes neuroprothèses sont étudiées pour aider à restaurer les fonctions de mobilité, à améliorer la qualité de vie et

l'autonomie des personnes amputées. Elles permettraient notamment aux patients de se tenir debout, de marcher, de diminuer l'effort perçu nécessaire pour déplacer le membre amputé et d'augmenter la vitesse de marche. (50) (52) (53)

La FES est également étudiée dans le cadre de la prise en charge de patients après une lésion de la moelle épinière, de paralysie cérébrale ou d'AVC pour les aider à retrouver leur capacité à se tenir debout, voire de marcher. Par exemple, un dispositif utilisant la FES est étudié pour les enfants atteints de paralysie cérébrale hémiplégique pour améliorer la vitesse de marche, l'endurance et la flexion de la cheville. Certains dispositifs tel que le WalkAide (AxioBionics) (Figure 20) visent une utilisation chez les personnes atteintes de sclérose en plaque ou de paralysie cérébrale spastique. Ce dispositif utilise des électrodes de surface pour stimuler le nerf péronier pendant la phase oscillante de la marche et activer lors de la stimulation les muscles dorsiflexeurs du pied. Le moment où il faut réaliser la stimulation est déterminé par un capteur qui mesure l'inclinaison et l'accélération de la jambe. (50) (51) (52) (54)



Figure 20: Dispositif WalkAide (51)

Les prothèses robotiques de membres inférieurs évoquées précédemment peuvent également être améliorées grâce au contrôle myoélectrique. Le contrôle myoélectrique se base sur les signaux de contrôle neuromusculaire enregistrés à partir des muscles via l'électromyographie (EMG) grâce à des électrodes EMG de surface bipolaire (intégré dans l'emboîture ou le revêtement de la prothèse avec association de textile conducteur) ou par des électrodes EMG implantables. Ces signaux sont traités via des algorithmes de décodage pour permettre un meilleur contrôle de prothèses robotiques des membres inférieurs et une meilleure coordination de l'intention du patient avec les

mouvements effectués par la prothèse. (55) La qualité des signaux EMG peut être affaiblie par différents facteurs : la sueur, les changements de volume du membre résiduel, les forces appliquées dans la zone de contact entre le membre et l'emboiture de la prothèse. Cette diminution de la qualité peut rendre difficile l'utilisation de cette technique. (55) Tout comme pour la FES, l'utilisation de l'EMG dépend de plusieurs facteurs pour permettre un contrôle myoélectrique des prothèses : la cause de l'amputation, la longueur et forme du membre résiduel, l'atrophie musculaire, la qualité des fibres musculaires.(55)

v. Interface cerveau-ordinateur

Une autre évolution technologique utilisée dans les recherches est l'interface cerveau-ordinateur ou BCI. Le BCI est un système interagissant avec le cerveau pour en extraire certaines informations. Le développement de cette technologie est important dans le cadre d'utilisation médicale pour améliorer la qualité de vie des patients. (56)

Le BCI est une technologie qui peut être invasive ou non invasive. Le BCI non invasif évalue l'activité oscillatoire cérébrale via par exemple l'électroencéphalographie (EEG) et utilise des algorithmes qui détectent les états cérébraux, les bio-signaux de l'intention motrice ainsi que les neurofeedback de l'action musculaire. Les algorithmes transcrivent ensuite les informations en commande pour contrôler le dispositif sur lequel ce système est intégré. L'utilisation de l'EEG dans le cadre du BCI se fait via un casque composé d'électrodes permettant ainsi la réception des signaux électriques générés par le cerveau du patient. L'EEG présente quelques désavantages : la faiblesse de certains signaux et la présence de signaux parasites. D'autres techniques de détection ont été développées comme la spectroscopie fonctionnelle dans le proche infrarouge qui détecte l'activité neuronale via l'utilisation d'une lumière infrarouge sur les tissus de la tête. Suite à l'absorption de cette lumière, les niveaux d'oxygénation sanguins sont estimés reflétant l'activité cérébrale. Toutefois cette technique est plus coûteuse. (56) (53)

Lorsque le BCI est invasif, des éléments tels que des micropuces sont placés dans le corps humain permettant une interaction directe avec le cerveau. Cette technique permet une diminution du risque de signaux parasites. (56) Le BCI fonctionne sur la détection de l'intention de se déplacer. Le BCI utilise la méthode de l'apprentissage automatique pour entraîner le mouvement du dispositif. (56)

Cette technologie a été utilisée sur des dispositifs déjà existants tel que les fauteuils roulants pour permettre d'améliorer l'indépendance et la qualité de vie des personnes en particulier pour les personnes souffrant de maladie neurologique affectant leur unité motrice. (56) (57) Les fauteuils pilotés par BCI sont actionnés uniquement par des signaux cérébraux par le biais de l'EEG. (56) L'utilisation du BCI/EEG dans les fauteuils roulants donne un sentiment à l'utilisateur de contrôle total puisqu'il peut émettre des commandes à tout moment même si elles sont limitées par l'utilisation de l'EEG. Pour permettre au patient d'avoir un bon contrôle de ce DM, de longues sessions de formations sont nécessaires avec un formateur expérimenté pour avoir des résultats optimaux. Cette étape peut se révéler fatigante pour le patient. (56)

Dans le cadre de la neuro-réhabilitation des patients, les recherches sont orientées vers l'utilisation du BCI en association avec le FES pour traduire les signaux cérébraux en commande de contrôle en combinant une commande motrice via les tentatives de mouvement et les informations sensorielles (FES). Le BCI permettrait au dispositif d'avoir la possibilité d'identifier les intentions de se déplacer en l'absence de mouvement manifeste du patient. (50) Cette association est déjà à l'étude pour restaurer la fonction de la main chez une personne tétraplégique. Son utilisation dans le cadre des troubles de la marche pourrait permettre à des patients de retrouver un certain niveau de mobilité. Cette technologie connectée au SNC, au cerveau, ou à la moelle épinière a démontré des résultats intéressants dans la restauration du contrôle des extrémités et peut déclencher une récupération motrice chez les patients. (50) (53) Parmi les recherches autour du BCI son utilisation dans le cadre de l'amélioration des prothèses est également étudiée. (56)

Actuellement ce type de technologie est utilisé dans des environnements cliniques. L'utilisation au domicile du patient n'est pas possible du fait de l'absence de DM portable disposant de cette technologie. (53)

vi. Intelligence artificielle

Au cours des dernières décennies, l'intelligence artificielle (IA) s'est énormément développée y compris dans le domaine médical. L'IA est de plus en plus utilisée dans le développement et l'amélioration de DMs pour extraire et analyser des informations grâce à l'utilisation de capteurs et le plus souvent à l'aide de l'utilisation d'un réseau neuronal artificiel. Ces appareils utilisant l'IA sont capables d'apprendre et d'utiliser des informations à partir de données brutes extraites des capteurs et l'utilisation

d'algorithmes pour ensuite simuler les caractéristiques comportementales du cerveau humain, pour analyser et traiter les données. (58) (59) (60)

Les cannes font parties des DMs où les recherches autour de l'IA sont réalisées pour améliorer la prise en charge des patients atteints de troubles de la mobilité. Ce nouveau type de canne de marche est équipé de capteurs alimentés par les basses-fréquences du mouvement humain (récupérées par une structure de récupération d'énergie). Ces cannes sont également équipées d'un système d'apprentissage qui va traiter et analyser les données récoltées par les capteurs via un réseau neuronal d'apprentissage. Ces données sont analysées via un système d'apprentissage en profondeur par un ordinateur permettant la surveillance de l'état du mouvement et des indicateurs de mobilité de l'utilisateur, de vérifier son identité, et d'évaluer son handicap. Ce nouveau DM peut prodiguer des conseils au patient sur la manière de se mouvoir et donner l'alerte en cas d'accident en activant une alarme. (58)

Cette canne intelligente pourrait être une aide pour les patients à mobilité réduite en améliorant leur autonomie et leur faisant se sentir plus en sécurité. Les données collectées peuvent être utilisées par le personnel soignant et/ou les aidants grâce au système de collecte des données. Ces données peuvent être envoyées de manière sécurisée aux personnes autorisées. (58)

Les cannes blanches pour les personnes aveugles sont également sujettes aux recherches pour l'utilisation de l'IA dans le cadre de l'amélioration de la mobilité. Dans ce cadre l'IA permettrait grâce au modèle d'apprentissage et d'une base de données de reconnaître le type d'obstacle se trouvant au contact de la canne et d'en informer l'utilisateur via une alerte vocale. Ce nouveau type de canne pourrait permettre d'améliorer la qualité de vie des personnes non/malvoyantes et de diminuer le risque d'accident et de chute. (59)

Les fauteuils roulants électriques sont également modifiés en utilisant l'IA pour permettre leur contrôle par les yeux en se basant sur les intentions visuelles via l'utilisation d'un réseau neuronal artificiel. (61) L'utilisation des mouvements oculaires dans le contrôle du fauteuil peut entraîner des difficultés du fait des mouvements oculaires involontaires ou d'observation de l'environnement qui sont reconnus à tort comme des données d'entrée. Ce phénomène est appelé le « problème du toucher de Midas ». Pour pallier à ce problème une des solutions est d'utiliser un modèle d'apprentissage qui estime l'intention visuelle en temps réel et estime le temps d'arrêt

du regard en distinguant la fixation intentionnelle (temps d'arrêt du regard plus long) des mouvements naturels des yeux. (61)

Le suivi oculaire est soit réalisé via l'électrooculographie (utilisation d'électrodes sur le front ou sur la peau autour des yeux) soit par l'utilisation de caméras pour capturer le mouvement des yeux soit par l'utilisation de trackers oculaire invasifs qui détectent la trajectoire du mouvement de la pupille. Les données utilisées par ce système sont enregistrées avant l'utilisation du fauteuil par le patient en apprenant au système des modèles issus de données sur les mouvements des yeux et de la tête. (61)

Des chercheurs s'intéressent également à l'utilisation de l'IA pour adapter cette technologie sur les déambulateurs pour aider les patients à effectuer des activités quotidiennes et/ou des activités physiques via des programmes d'exercices pouvant être personnalisés. (Figure 21). (62) (63).

Un des exemples de déambulateurs utilisant l'IA en cours de développement est le « I-Walk » (iWALKFree). Ce déambulateur robotique intelligent intègre des fonctionnalités d'interaction homme-robot verbale (reconnaissance vocale) et non verbale. Il apporte une assistance ambulatoire et cognitive. Ce DM utilise l'acquisition et le traitement des signaux et la prédiction des actions de l'utilisateur, l'analyse de la marche en temps réel permettant l'évaluation clinique de l'utilisateur et le suivi de ces progrès. (62) (63)

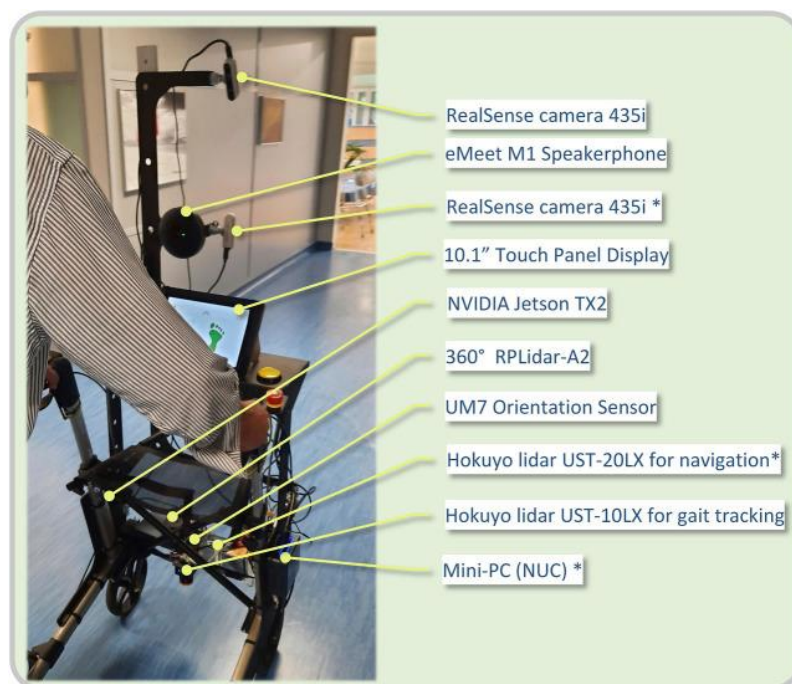


Figure 21 : Modèle de déambulateur utilisant l'IA (62)

Le dispositif « I-Walk » utilise des capteurs et des caméras pour l'analyse de la position et de la marche du patient. L'IA va permettre grâce à un ensemble d'intentions prédéfinies d'aider le patient lorsque ce dernier indique par voie orale ses intentions tel que « je veux me lever ». Grâce à cette base de données le déambulateur aurait la capacité de comprendre les activités quotidiennes des patients tel que la réalisation d'exercice via un système de reconnaissance des actions comme un réseau de neurone artificiel. (62) (63)

Les prothèses de membres inférieurs notamment les neuroprothèses font également l'objet de recherche autour de l'IA. L'utilisation de l'IA dans le cadre des prothèses permet d'adapter les algorithmes de contrôle de la prothèse à chaque utilisateur et de traiter les données récoltées par EEG ou EMG avec de meilleure précision en temps réel. Cette technologie permettrait d'améliorer la reconnaissance de l'intention et les performances de contrôle de la prothèse, elle entrainerait une diminution voire une suppression du temps de retard de la reconnaissance de l'intention de mouvement ainsi que les problèmes de locomotion ou la réalisation de mauvais mouvement. Cette reconnaissance est réalisée grâce aux signaux émis par des capteurs présents sur la prothèse. Les données reconnues sont traitées et analysées par le réseau de neurones artificiels et des algorithmes. (53) (60) (64) (65) L'utilisation de l'IA dans ce cadre nécessite une formation du patient pour récolter les données nécessaires à l'utilisation de la prothèse, ce qui peut se révéler long et difficile. (64) (65)

b. Création de nouveaux types de dispositifs

Outre la modification de DMs déjà existants, de nouveaux types de dispositifs d'aide à la mobilité sont apparus au cours des dernières années grâce à l'évolution des technologies et l'amélioration des connaissances scientifiques et médicales. Dans les paragraphes ci-dessous seront présentés de manière non exhaustive de nouveaux types de dispositifs apparus sur le marché ou en cours de développement.

i. Biofeedback

La rétroaction biologique ou biofeedback n'est pas seulement utilisée pour modifier des DMs existants tel que vu précédemment. Cette technique est également étudiée pour développer de nouveaux dispositifs dans le cadre de la prise en charge de certaines pathologies tel que la maladie de Parkinson ou les AVC. Par exemple, pour

les patients ayant eu un AVC et souffrant d'une démarche asymétrique, des DMs comme le dispositif « Walk-Even » (Figure 22) (California State University) sont en développement. Ils utilisent le biofeedback en temps réel pour améliorer la marche des patients (amélioration de l'asymétrie, de la pression du pied, du temps de transfert talon-avant du pied, de l'asymétrie de position, l'équilibre, etc.) (66) (67)

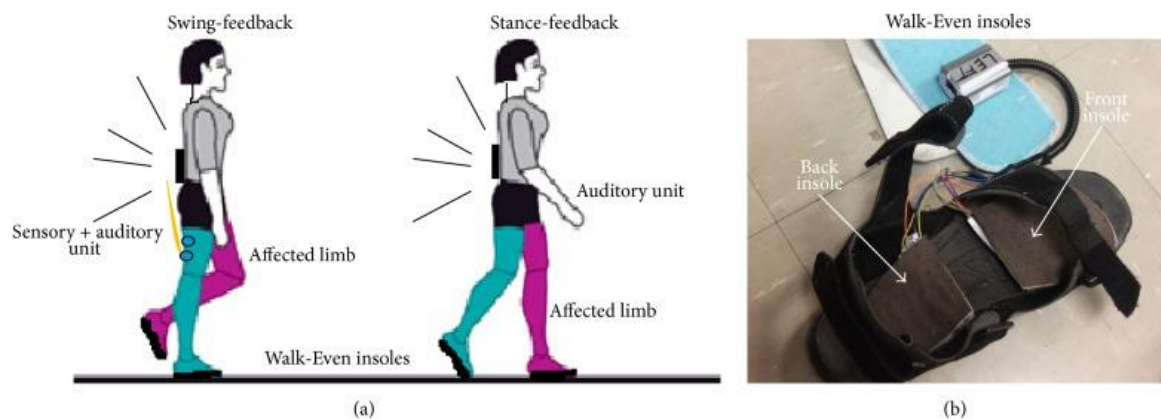


Figure 22: Fonctionnement des semelles de biofeedback (66)

Ces dispositifs fonctionnent via des systèmes de capteurs de pressions/forces réglables. Ces capteurs sont disposés dans les semelles intérieures des chaussures et vont permettre au DM de calculer grâce à un algorithme les paramètres de marche (temps de marche, temps d'oscillation, position des jambes) et ainsi détecter les problèmes d'asymétrie. À la suite de la récolte et analyse de ces informations, le DM va fournir un retour sensoriel électrotactile via un stimulus électrique léger et auditif au patient concernant le balancement du patient. Ce stimulus va permettre de corriger sa démarche. (Figure 22).

Les éléments de biofeedback ainsi que de contrôle du dispositif (marche/arrêt, mode, etc.) sont portés autour de la taille du patient et l'unité émettant les signaux électrotactile est placée sur la cuisse non affectée du patient. Ce type de système dispose d'une capacité de sauvegarde des données qui donne la possibilité aux personnels soignants (kinésithérapeute, médecin traitant) de réaliser un suivi plus précis des capacités de marche du patient. (66) (67) (68) Ce type de dispositif a montré lors d'étude une amélioration de la charge du membre parétique : amélioration de 51% pour le groupe expérimentale contre 26% pour le groupe témoin après les exercices à la suite d'une utilisation régulière du DM . Il a également été observé durant l'étude

une amélioration significative de la symétrie de la marche suite à l'utilisation régulière de ce type de DM passant d'un t-stat de 0.818 ($p=0.229$) entre le groupe témoin et expérimental en début de test à un t-stat de 3.185 ($p=0.016$) en post-traitement. (66) (67)

Ce modèle de DM présente un avantage dans la prise en charge des patients qui est la possibilité de son utilisation dans un cadre non clinique pour le patient ayant des troubles de la marche mais pouvant se mobiliser de manière autonome. (67) Il peut également être utilisé chez la personne âgée pour permettre d'augmenter le temps d'oscillation de la marche et diminuer certaines difficultés de la marche. Des études ont démontré l'efficacité de ces semelles dites « intelligentes » qui améliorent la longueur de foulée de 4.52 % (passant de 135 à 142cm) et la flexion de la hanche de 14.73 % (passant de 27 à 31°) et entraînent une diminution de la cadence de marche de 5.5 % (passant 119 à 113 pas/min) de manière significative ($p<0.05$). (68)

Des applications numériques développées dans un but médical sont de plus en plus présentes sur le marché des DMs y compris dans le domaine de la prise en charge des troubles de la mobilité via l'utilisation du biofeedback.

Un des exemples d'application utilisée dans la mobilité est un DM non invasif fonctionnant via une application Android. Ce DM réduirait la durée des épisodes de blocage de la marche (FOG) dans la maladie de Parkinson. (69) Ce DM est à faible coût et permet la surveillance de la marche du patient. Il administre de manière externe une stimulation vibratoire superficielle aux niveaux des membres inférieurs lors d'un épisode de FOG pour aider à la reprise de la marche. (Figure 23) (69)

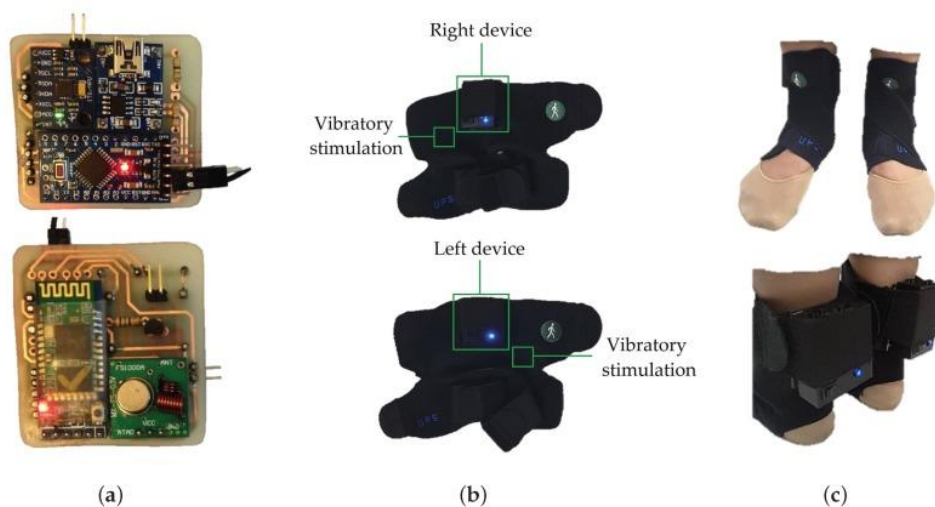


Figure 23: DM de biofeedback dans le cadre de la maladie de Parkinson (69)

Ce DM basé sur l'application « FOG Detection » (de-vis-software) utilise un accéléromètre pour acquérir les données de marche. La récolte des données s'effectue via deux éléments attachés aux membres inférieurs par des supports ergonomiques et réglables. Les données sont recueillies via Bluetooth, envoyées sur l'application puis traitées par un algorithme qui va détecter les épisodes de FOG en temps réel. Les éléments électroniques sont alimentés par des batteries au lithium, et font un poids entre 210 et 220 g. (69) Lors d'un épisode de FOG, une stimulation vibratoire va être émise pour réduire voire interrompre ce dernier. La reprise de la marche peut être plus brusque et avec des mouvements plus accélérés par rapport à une marche dite « normale ». (69) D'autres anomalies motrices peuvent être également détectées par ce DM. Il permet au patient d'avoir une aide pour se déplacer et effectuer ses activités quotidiennes, d'avoir une surveillance en temps réel. Le stockage des données de marche peut permettre aux soignants de mieux comprendre les épisodes de FOG du patient et d'adapter sa prise en charge. (69)

ii. Stimulation auditive

Les DMs de stimulation auditive dans la prise en charge de la maladie de Parkinson avec ou sans FOG pour prévenir les chutes ont fait leur apparition. (70) (71)

Le principe de la stimulation auditive est de synchroniser les mouvements de la marche avec des signaux temporels prévisibles. Cette technique se base sur le fait que la musique, avec un rythme assez fort, induit la synchronisation du tapotement du pied avec le rythme musical. De plus la musique augmenterait l'attention anticipative des patients sur leur mouvement de marche. (70)

Ce type de DM est composé de capteurs dans les semelles intérieures des chaussures. Ils sont connectés à un émetteur radio attaché à la ceinture des patients. Ces DMs sont également pourvus d'un appareil portatif fournissant une stimulation auditive (des clics) via des écouteurs. Les stimuli auditifs sont délivrés par des impulsions régulières (par exemple 50 ms). Les données sont enregistrées pour permettre l'analyse des données du patient et voir l'amélioration ou non de sa mobilité. (71) Selon des études, après plusieurs semaines d'utilisation le nombre de chute réduit significativement, l'indice de chute passant de 12.7 en pré-traitement à 3.1 pour le groupe expérimental ($p < 0.05$) à la fin des séances d'entraînement. Après 16 semaines d'essai l'indice de chute était de 4.0 pour le groupe expérimental contre 10.3 pour le groupe contrôle ($p < 0.005$). Une modification de certains paramètres de marche

comme la vitesse, la longueur de pas, la stabilité, la réduction des FOG et le temps de virage ainsi que le risque de chute, etc. ont été observés. (70) (71)

iii. Stimulation électrique fonctionnelle

La stimulation électrique fonctionnelle est une stratégie en cours de développement pour la récupération de la marche, notamment chez les patients ayant subi un AVC. Ce type de dispositif est composé d'électrodes qui vont émettre une stimulation électrique simultanée de plusieurs muscles au niveau du membre déficient. Cette stimulation provoque une contraction musculaire. Ce DM est également composé de capteurs EMG pour déterminer la synergie musculaire. Cette FES est basée sur la synergie musculaire et l'analyse de la posture de la marche lors des séances de rééducation dans le but d'améliorer la synergie musculaire et la performance de la marche en améliorant la coordination musculaire et en soutenant les muscles affaiblis. Cette méthode de rééducation utilise la plasticité cérébrale et l'apprentissage moteur pour permettre au patient de retrouver une mobilité autonome. (72)

La FES est étudiée dans la création de DM à base de textile combinant un tissu avec des sections incorporant des fils conducteurs. Ce DM permettrait d'apporter un certain confort au patient. Dans une étude il a été démontré que l'utilisation de textile dans le cadre de la FES a permis de délivrer une stimulation au niveau du muscle tibiale qui entraîna la dorsiflexion du pied. (50)

iv. Robotiques et Exosquelettes

Depuis le début des années 2000 une nouvelle génération de DM d'aide à la mobilité se développe : les exosquelettes. Ce sont des systèmes robotiques portables équipés de puissants actionneurs au niveau des articulations humaines permettant d'aider au mouvement. Les exosquelettes peuvent être dit complets en assistant la totalité du membre inférieur, ou partiels en ne soutenant qu'une ou quelques articulations. (73) (74) (75)

Les premiers DMs de cette génération ont été approuvés par la FDA en 2014 avec le DM ReWalk (ReWalk Robotics). Au départ développé par l'armée, les exosquelettes robotiques ou orthèses motorisées ont vu leur utilisation orientée dans le domaine médical et notamment dans la rééducation et la réadaptation. La recherche tend vers une utilisation des exosquelettes dans de nombreuses pathologies qui touchent à la

mobilité (les lésions médullaire, paralysie des membres inférieurs) pour permettre au patient de retrouver une mobilité. (73) (74) (76) (77)

Les exosquelettes sont composés d'un cadre rigide réglable, de moteurs, de batterie ayant une autonomie variable (entre 2 et 8 heures), de différents modules, de tiges permettant d'offrir une aide au maintien et à la mise en mouvement des membres. Des boutons de commande, des électrodes pour l'EEG ou l'EMG et des capteurs pour le déclenchement des mouvements composent également certains exosquelettes. Les capteurs sur certains modèles peuvent détecter via l'IA l'intention de mouvement de l'utilisateur et fournir une mobilité initiée par l'utilisateur. Des systèmes de freins sont également présents pour éviter le risque de déformation de certaines pièces et pour diminuer le risque de chute du patient. Sur certains modèles des repose-pieds peuvent être présents. (73) (74) (75) (76) (77) (78)



Figure 24: Exemples d'exosquelettes (74)

Le design et le poids de l'exosquelette varient selon les modèles (Figure 24) et leurs indications. Certains exosquelettes comme le Rewalk (ReWalk Robotics) disposent d'appareils d'assistance tels que des béquilles d'avant-bras ou de déambulateur. L'ajout de ces éléments d'assistance rendent impossible l'utilisation de ces dispositifs chez les personnes présentant un dysfonctionnement au niveau des membres supérieurs comme par exemple certains patients ayant subi un AVC. (73)

D'autres modèles se concentrent sur l'actionnement des membres inférieurs au niveau du genou tel que l'exosquelette ABLE (Able Human Motion) (Figure 25). Ce type d'actionnement a pour but d'aider le patient à s'asseoir, se mettre debout et marcher dans le cas d'une lésion de la moelle épinière en fournissant une assistance pour la flexion-extension du genou. Cette assistance suit une trajectoire d'angle de l'articulation du genou prédéfinie. Ces exosquelettes flexibles des membres inférieurs fonctionnent grâce à un système d'entraînement flexible et de systèmes pneumatiques qui diminuent la rigidité de ces DMs comparé à d'autres exosquelettes. (78) (79)



Figure 25: Exosquelette à propulsion du genou (78)

Des exosquelettes plus légers, moins coûteux et non alimentés sont en cours de développement dans l'assistance à la marche des personnes ayant subi un AVC. Un de ces modèles est le « Kickstart » (Cadence biomedical) (Figure 26) et a pour but d'améliorer l'équilibre et la marche pour les patients post-AVC. Il se compose d'une ceinture, d'un support externe et d'un extenseur. Ce dernier reproduit l'effet d'un tendon artificiel en s'inspirant des caractéristiques anatomiques des membres postérieurs du cheval, il va stocker l'énergie pendant la phase d'appui et la libère lors de la phase d'oscillation. (80)



Figure 26: Exosquelette Kickstart (80)

Les exosquelettes se sont fortement développés au départ pour une utilisation dans un cadre hospitalier pour la rééducation de la marche et maintenant vers une utilisation au domicile des patients avec le dispositif ReWalk et le Indego (Ekso Bionics Holdings). Chaque exosquelette a ses propres caractéristiques et capacités, leur utilisation peut être large ou spécifique à certaines pathologies et utilisables uniquement ou non dans un cadre hospitalier. (73) (77)

Pour pouvoir utiliser un exosquelette il existe des contraintes de taille et de poids différentes selon les modèles. Le patient doit avoir une amplitude de mouvement minimale au niveau des membres inférieurs et des séances d'entraînement sont nécessaires (entre 10 et 15 séances). La FDA exige qu'une personne formée (soignant ou membre de la famille) soit avec le patient lors de l'utilisation de l'exosquelette pour assurer la sécurité de l'utilisateur, cette exigence diminue ainsi l'autonomie des utilisateurs. (73)

Les exosquelettes peuvent permettre d'augmenter la vitesse de marche et l'endurance par rapport à des dispositifs plus classiques. Ils permettent également d'améliorer le transfert du poids lors de la marche. Certains modèles aident à monter les escaliers. Ils permettent à l'utilisateur d'avoir les mains libres et de pouvoir réaliser des tâches de la vie quotidienne. La confiance des patients utilisant des exosquelettes et le sentiment de sécurité ont augmentés par rapport à l'utilisation de DM classique. Entre les différents modèles d'exosquelettes, il existe des différences en termes de

performances et de contraintes. Le choix du modèle devra donc être adapté selon la pathologie du patient. (73) (74) (75) (78) (80)

Des effets indésirables liés à l'utilisation de ces exosquelettes ont pu être observés lors d'études ou rapportés par le personnel soignant. Ces effets sont des problèmes cutanées (rougeurs, écorchures), des œdèmes, des ecchymoses, des entorses et des fractures de la cheville. (73) (76) (77)

V. DISCUSSION

La prise en charge des difficultés à la mobilité est un défi depuis longtemps et encore pour l'avenir avec le vieillissement de la population. Malgré le nombre de DMs existants sur le marché pour la prise en charge des troubles de la marche, aucun n'est optimal. Chaque pathologie présente ses inconvénients, et chaque patient présente ses particularités, rendant difficile l'utilisation d'un seul type de DMs pour tous.

Les progrès technologiques ont permis d'innover dans ce domaine permettant d'offrir plus d'options pour combler les déficits de la mobilité. L'innovation et l'avancée des technologies informatiques vont permettre d'améliorer les DMs d'aide à la marche. Grâce à la recherche et à l'évolution des technologies, notamment l'intelligence artificielle, les dispositifs bioniques et les matériaux légers, de nouveaux DMs vont continuer d'être conçus dans ce domaine. Ces dispositifs pourront peut-être prendre en charge toutes les pathologies et facteurs de risques qui entraînent une diminution de la mobilité. L'apparition de DMs peu ou pas visibles notamment au niveau des exosquelettes pourraient rendre peu perceptible le handicap des personnes souffrant de problèmes de mobilité et améliorer ainsi leur insertion sociale.

Cependant de nombreux problèmes peuvent encore se poser tels que la nécessité d'une recharge pour les dispositifs sur batterie limitant ainsi l'autonomie. Le poids des dispositifs tel que les exosquelettes est aussi un facteur limitant. La capacité d'analyse d'une grande quantité de données par les systèmes informatiques peut être limitée par les capacités d'analyses et de sauvegardes de données des technologies actuelles. Il est nécessaire de disposer d'un grand nombre de données et du temps de formation est nécessaire pour permettre le fonctionnement optimal et sécurisé des dispositifs avec une IA. Ce temps de formation peut être rédhibitoire pour le patient ou peut poser des problèmes dans certaines pathologies comme dans la rééducation à la suite d'une opération des membres inférieurs ou post- AVC.

La question de l'utilisation et la sécurité des données notamment avec l'IA se pose à la suite des problèmes de piratages de données médicales qui sont de plus en plus présents. Une réflexion sur la sécurisation de ces données devra sûrement être investiguée.

L'aspect esthétique et l'acceptabilité des patients sera un point d'attention dans l'avenir de l'innovation des DMs d'aide à la mobilité. Les DMs comme les prothèses bioniques ou les exosquelettes peuvent être peu esthétique et pour certains imposants. Ces DMs peuvent donner au patient l'impression de devenir un robot et ainsi diminuer l'acceptabilité à utiliser ces dispositifs.

Des questions également sur le coût de ces innovations se posent. En effet l'innovation a un prix qui dans certains pays ne peut être payer par les personnes à mobilité réduite ou du fait de l'absence de remboursement de certains de ces DMs. Ces éléments peuvent limiter l'accès à ces DMs et à une possible meilleure prise en charge des personnes. C'est le cas des prothèses dont les prix peuvent être élevés. Le journaliste sportif français Mathieu Lartot qui fut amputé de sa jambe a récemment dénoncé le coût des prothèses de jambes pouvant monter jusqu'à 100 000 euros. Cela montre que même dans des pays avec des aides telles que la sécurité sociale les DMs d'aide à la mobilité et l'innovation ne sont pas accessibles à tous. Et les établissements de santé ne peuvent se permettre au vu du prix de ces dispositifs d'investir dans chaque innovation de rééducation.

Au vu de la vitesse d'évolution des technologies et d'amélioration des DMs, l'innovation pourrait ne pas être utilisée par les patients et personnels soignants. Le manque de recul et de données cliniques prouvant l'efficacité et la sécurité diminue la confiance des personnes envers ces nouveaux dispositifs.

L'innovation présente donc pour l'instant de nombreuses limites qui pourront peut-être à l'avenir être palliées via les évolutions techniques, scientifiques et médicales. Une des priorités devraient être de permettre à tous d'avoir accès à ces nouvelles technologies pour un accès égal aux soins, de restaurer au mieux l'autonomie et la qualité de vie des personnes souffrant de difficulté à la mobilité.

VI. BIBLIOGRAPHIE

1. Santé mentale et vieillissement [Internet]. [cité 10 avr 2023]. Disponible sur: <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/mental-health-of-older-adults>
2. L'OMS lance une application numérique pour améliorer les soins aux personnes âgées [Internet]. [cité 10 avr 2023]. Disponible sur: <https://www.who.int/fr/news/item/30-09-2019-who-launches-digital-app-to-improve-care-for-older-people>
3. Organisation mondiale de la Santé, United States. Agency for International Development. Document de synthèse conjoint sur la fourniture de dispositifs d'aide à la mobilité dans les régions à faibles revenus : un pas vers la mise en œuvre de la Convention relative aux droits des personnes handicapées en matière de mobilité personnelle [Internet]. Genève: Organisation mondiale de la Santé; 2012 [cité 10 avr 2023]. 31 p. Disponible sur: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/75858>
4. Larousse É. Définitions : mobilité - Dictionnaire de français Larousse [Internet]. [cité 10 avr 2023]. Disponible sur: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/mobilit%C3%A9/51890>
5. Mobility in Older Adults: A Comprehensive Framework | The Gerontologist | Oxford Academic [Internet]. [cité 10 avr 2023]. Disponible sur: <https://academic.oup.com/gerontologist/article/50/4/443/743504>
6. Tyson S, Connell L. The psychometric properties and clinical utility of measures of walking and mobility in neurological conditions: a systematic review. Clin Rehabil. nov 2009;23(11):1018-33.
7. Édition professionnelle du Manuel MSD [Internet]. [cité 10 avr 2023]. Troubles de la marche chez les personnes âgées - Gériatrie. Disponible sur: <https://www.msmanuals.com/fr/professional/g%C3%A9riatrie/troubles-de-la-marche-chez-les-personnes-%C3%A2g%C3%A9es/troubles-de-la-marche-chez-les-personnes-%C3%A2g%C3%A9es>
8. Johnson J, Rodriguez MA, Al Snih S. Life-Space Mobility in the Elderly: Current Perspectives. Clin Interv Aging. 2020;15:1665-74.
9. Hill M, Healy A, Chockalingam N. Effectiveness of therapeutic footwear for children: A systematic review. J Foot Ankle Res. 13 mai 2020;13(1):23.

10. Chutes [Internet]. [cité 16 avr 2023]. Disponible sur: <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/falls>
11. [referentiel_concernant_levaluation_du_risque_de_chutes_chez_le_sujet_age_autonome_et_sa_prevention.pdf](https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2013-04/referentiel_concernant_levaluation_du_risque_de_chutes_chez_le_sujet_age_autonome_et_sa_prevention.pdf) [Internet]. [cité 16 avr 2023]. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2013-04/referentiel_concernant_levaluation_du_risque_de_chutes_chez_le_sujet_age_autonome_et_sa_prevention.pdf
12. Inserm [Internet]. [cité 23 avr 2023]. Maladie de Parkinson · Inserm, La science pour la santé. Disponible sur: <https://www.inserm.fr/dossier/parkinson-maladie/>
13. CHUV [Internet]. [cité 23 avr 2023]. Mobilité. Disponible sur: <https://www.chuv.ch/fr/neuropsych/npr-home/patients-et-familles/troubles-du-systeme-nerveux/mobilite>
14. Espejo-Antúnez L, Pérez-Mármol JM, Cardero-Durán M de LÁ, Toledo-Marhuenda JV, Albornoz-Cabello M. The Effect of Proprioceptive Exercises on Balance and Physical Function in Institutionalized Older Adults: A Randomized Controlled Trial. *Arch Phys Med Rehabil.* oct 2020;101(10):1780-8.
15. Mylius CF, Paap D, Takken T. Reference value for the 6-minute walk test in children and adolescents: a systematic review. *Expert Rev Respir Med.* déc 2016;10(12):1335-52.
16. Minimal clinically important difference for change in 6-minute walk test distance of adults with pathology: a systematic review - Bohannon - 2017 - *Journal of Evaluation in Clinical Practice* - Wiley Online Library [Internet]. [cité 30 avr 2023]. Disponible sur: <https://onlinelibrary-wiley-com.ressources-electroniques.univ-lille.fr/doi/10.1111/jep.12629>
17. Nicolini-Panisson RD, Donadio MVF. Timed « Up & Go » test in children and adolescents. *Rev Paul Pediatr Orgao Of Soc Pediatr Sao Paulo.* sept 2013;31(3):377-83.
18. Nierat MC, Demiri S, Dupuis-Lozeron E, Allali G, Morélot-Panzini C, Similowski T, et al. When Breathing Interferes with Cognition: Experimental Inspiratory Loading Alters Timed Up-and-Go Test in Normal Humans. *PLOS ONE.* 15 mars 2016;11(3):e0151625.

19. 10MWalkTest.pdf [Internet]. [cité 25 avr 2023]. Disponible sur:
<https://www.actidiane.fr/10MWalkTest.pdf>
20. University of Utah, Zambrana I, DeLaTorre A, Portland State University. Life-Space Mobility and Aging in Place [Internet]. Transportation Research and Education Center (TREC); 2019 mai [cité 30 avr 2023]. Disponible sur:
<https://archives.pdx.edu/ds/psu/29182>
21. Thomas M, Jankovic J, Suteerawattananon M, Wankadia S, Caroline KS, Vuong KD, et al. Clinical gait and balance scale (GABS): validation and utilization. *J Neurol Sci.* 15 janv 2004;217(1):89-99.
22. msws-eng.pdf [Internet]. [cité 30 avr 2023]. Disponible sur:
<https://www.sralab.org/sites/default/files/2017-07/msws-eng.pdf>
23. McGlinchey MP, James J, McKeivitt C, Douiri A, Sackley C. The effect of rehabilitation interventions on physical function and immobility-related complications in severe stroke: a systematic review. *BMJ Open.* 5 févr 2020;10(2):e033642.
24. Spinal cord injury [Internet]. [cité 1 mai 2023]. Disponible sur:
<https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/spinal-cord-injury>
25. Aman JE, Elangovan N, Yeh IL, Konczak J. The effectiveness of proprioceptive training for improving motor function: a systematic review. *Front Hum Neurosci* [Internet]. 2015 [cité 7 mai 2023];8. Disponible sur:
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2014.01075>
26. Hunt PC, Boninger ML, Cooper RA, Zafonte RD, Fitzgerald SG, Schmeler MR. Demographic and socioeconomic factors associated with disparity in wheelchair customizability among people with traumatic spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil.* 1 nov 2004;85(11):1859-64.
27. calameo.com [Internet]. [cité 15 mai 2023]. LIVRET SNITEM HANDICAP MOTEUR. Disponible sur:
<https://www.calameo.com/snitem/read/000610542667a10ea60a5>
28. Édition professionnelle du Manuel MSD [Internet]. [cité 15 mai 2023]. Appareils thérapeutiques et d'assistance - Sujets spéciaux. Disponible sur:
<https://www.msmanuals.com/fr/professional/sujets-sp%C3%A9ciaux/r%C3%A9ducation/appareils-th%C3%A9rapeutiques-et-assistance>

29. Pharmacie Saint-Martin [Internet]. [cité 15 mai 2023]. CANNE DERBY PLIANTE BLISTER - O7785. Disponible sur:
<https://www.pharmaciesaintmartin.fr/produit/canne-derby-pliante-blister>
30. Canne de dépannage et de signallement rétractable en titane [Internet]. [cité 15 mai 2023]. Disponible sur: <https://www.ceciasa.com/canne-alu-aveugle-retractable-en-titane.html>
31. guide_fauteuil.pdf [Internet]. [cité 18 mai 2023]. Disponible sur:
http://www.imc.apf.asso.fr/IMG/pdf/guide_fauteuil.pdf
32. Gouvernement du Canada B de la sécurité des transports du C. Rapport d'enquête sur la sécurité du transport ferroviaire R18V0127 [Internet]. 2019 [cité 18 mai 2023]. Disponible sur: <https://www.bst-tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/rail/2018/R18V0127/R18V0127.html>
33. Médical Domicile [Internet]. [cité 21 mai 2023]. Scooter 4 roues pour handicapé Traveler - Medical Domicile. Disponible sur:
https://medicalem domicile.fr/scooter-4-roues/2530-107800-scooter-4-roues-handicape-traveler.html?gclid=CjwKCAjwgqejBhBAEiwAuWHioKogdLqfa_Pf-09GTQ1ac34bw379hu5jELm2W9MVKKMwraZqcSvivRoCW5YQAvD_BwE
34. fr-417.jpg (Image JPEG, 600 × 400 pixels) [Internet]. [cité 4 juin 2023]. Disponible sur: <https://www.bulle-confort.fr/album-photo/prothese-membre-inferieur-52/fr-417.jpg>
35. MARTY V. PhysioStudent. [cité 4 juin 2023]. Introduction à l'appareillage. Disponible sur: <https://www.physiostudent.fr/cours/themes/amputation-du-membre-inferieur-1/introduction-a-l-appareillage-13>
36. Manuel d'Oslo – Principes directeurs pour le recueil et l'interprétation des données sur l'innovation.
37. Article R165-63 - Code de la sécurité sociale - Légifrance [Internet]. [cité 8 mai 2023]. Disponible sur:
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000030253337
38. Haute Autorité de Santé [Internet]. [cité 8 mai 2023]. Dispositifs médicaux innovants : le dispositif de prise en charge transitoire opérationnel. Disponible sur:
https://www.has-sante.fr/jcms/p_3268128/fr/dispositifs-medicaux-innovants-le-dispositif-de-prise-en-charge-transitoire-operationnel
39. Corinne C. Forfait innovation : dépôt de dossier de demande de prise en charge dérogatoire pour un produit innovant. 2015;

40. Han JJ. A man with severed spine is able to walk again following implantation of electrical stimulation device. *Artif Organs*. mai 2022;46(5):729-30.
41. Ward SH, Wiedemann L, Stinear J, Stinear C, McDaid A. The effect of a novel gait retraining device on lower limb kinematics and muscle activation in healthy adults. *J Biomech*. 22 août 2018;77:183-9.
42. Dupret I, Gräske J, Venn R, Renaud D. [Initial results of the evaluation of a digital rollator]. *Z Gerontol Geriatr*. 7 oct 2022;
43. Tran M, Gabert L, Hood S, Lenzi T. A lightweight robotic leg prosthesis replicating the biomechanics of the knee, ankle, and toe joint. *Sci Robot*. 23 nov 2022;7(72):eabo3996.
44. LaPre AK, Wedge RD, Umberger BR, Sup FC. Preliminary study of a robotic foot-ankle prosthesis with active alignment. *IEEE Int Conf Rehabil Robot Proc*. juill 2017;2017:1299-304.
45. Herr HM, Grabowski AM. Bionic ankle-foot prosthesis normalizes walking gait for persons with leg amputation. *Proc Biol Sci*. 7 févr 2012;279(1728):457-64.
46. Knight AD, Jayaraman C, Elrod JM, Schnall BL, McGuire MS, Sleeman TJ, et al. Functional Performance Outcomes of a Powered Knee-Ankle Prosthesis in Service Members With Unilateral Transfemoral Limb Loss. *Mil Med*. 27 juill 2022;usac231.
47. Goldstein T, Oreste A, Hutnick G, Chory A, Chehata V, Seldin J, et al. A Pilot Study Testing a Novel 3D Printed Amphibious Lower Limb Prosthesis in a Recreational Pool Setting. *PM R*. août 2020;12(8):783-93.
48. Rokhmanova N, Rombokas E. Vibrotactile Feedback Improves Foot Placement Perception on Stairs for Lower-Limb Prosthesis Users. *IEEE Int Conf Rehabil Robot Proc*. juin 2019;2019:1215-20.
49. Keri MI, Shehata AW, Marasco PD, Hebert JS, Vette AH. A Cost-Effective Inertial Measurement System for Tracking Movement and Triggering Kinesthetic Feedback in Lower-Limb Prosthesis Users. *Sensors*. 6 mars 2021;21(5):1844.
50. Marquez-Chin C, Popovic MR. Functional electrical stimulation therapy for restoration of motor function after spinal cord injury and stroke: a review. *Biomed Eng Online*. 24 mai 2020;19(1):34.
51. Moll I, Marcellis RGJ, Coenen MLP, Fleuren SM, Willems PJB, Speth LAWM, et al. A randomized crossover study of functional electrical stimulation during walking

in spastic cerebral palsy: the FES on participation (FESPa) trial. *BMC Pediatr.* 13 janv 2022;22(1):37.

52. Khurana SR, Beranger AG, Felix ER. Perceived Exertion Is Lower When Using a Functional Electrical Stimulation Neuroprosthesis Compared With an Ankle-Foot Orthosis in Persons With Multiple Sclerosis: A Preliminary Study. *Am J Phys Med Rehabil.* mars 2017;96(3):133-9.

53. Koelewijn AD, Audu M, Del-Ama AJ, Colucci A, Font-Llagunes JM, Gogeoascoechea A, et al. Adaptation Strategies for Personalized Gait Neuroprosthetics. *Front Neurobotics.* 2021;15:750519.

54. An exploratory study of gait and functional outcomes after neuroprosthesis use in children with hemiplegic cerebral palsy - PubMed [Internet]. [cité 6 juin 2023]. Disponible sur: <https://pubmed-ncbi-nlm-nih-gov.ressources-electroniques.univ-lille.fr/27636551/>

55. Fleming A, Stafford N, Huang S, Hu X, Ferris DP, Huang HH. Myoelectric control of robotic lower limb prostheses: a review of electromyography interfaces, control paradigms, challenges and future directions. *J Neural Eng.* 27 juill 2021;18(4).

56. Naser MYM, Bhattacharya S. Towards Practical BCI-Driven Wheelchairs: A Systematic Review Study. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng Publ IEEE Eng Med Biol Soc.* 11 janv 2023;PP.

57. Padfield N, Agius Anastasi A, Camilleri T, Fabri S, Bugeja M, Camilleri K. BCI-controlled wheelchairs: end-users' perceptions, needs, and expectations, an interview-based study. *Disabil Rehabil Assist Technol.* 11 mai 2023;1-13.

58. Guo X, He T, Zhang Z, Luo A, Wang F, Ng EJ, et al. Artificial Intelligence-Enabled Caregiving Walking Stick Powered by Ultra-Low-Frequency Human Motion. *ACS Nano.* 28 déc 2021;15(12):19054-69.

59. Hingorani VV, Mukherjee D, Sharma K, Mani G, M MS, Stonier AA. Design and development of a smart blind walking stick using machine learning. *J Med Eng Technol.* mai 2022;46(4):335-40.

60. Wang Q. Research on the Improved CNN Deep Learning Method for Motion Intention Recognition of Dynamic Lower Limb Prosthesis. *J Healthc Eng.* 2021;2021:7331692.

61. Higa S, Yamada K, Kamisato S. Intelligent Eye-Controlled Electric Wheelchair Based on Estimating Visual Intentions Using One-Dimensional Convolutional Neural Network and Long Short-Term Memory. *Sensors.* 16 avr 2023;23(8):4028.

62. Moustiris G, Kardaris N, Tsiami A, Chalvatzaki G, Koutras P, Dometios A, et al. The i-Walk Lightweight Assistive Rollator: First Evaluation Study. *Front Robot AI*. 2021;8:677542.
63. Ju F, Wang Y, Xie B, Mi Y, Zhao M, Cao J. The Use of Sports Rehabilitation Robotics to Assist in the Recovery of Physical Abilities in Elderly Patients with Degenerative Diseases: A Literature Review. *Healthc Basel Switz*. 21 janv 2023;11(3):326.
64. Young AJ, Simon AM, Fey NP, Hargrove LJ. Intent recognition in a powered lower limb prosthesis using time history information. *Ann Biomed Eng*. mars 2014;42(3):631-41.
65. Spanias JA, Simon AM, Hargrove LJ. Across-user adaptation for a powered lower limb prosthesis. *IEEE Int Conf Rehabil Robot Proc*. juill 2017;2017:1580-3.
66. Krishnan V, Khoo I, Marayong P, DeMars K, Cormack J. Gait Training in Chronic Stroke Using Walk-Even Feedback Device: A Pilot Study. *Neurosci J*. 2016;2016:6808319.
67. Khoo IH, Marayong P, Krishnan V, Balagtas M, Rojas O, Leyba K. Real-time biofeedback device for gait rehabilitation of post-stroke patients. *Biomed Eng Lett*. nov 2017;7(4):287-98.
68. Giraldo-Pedroza A, Lee WCC, Lam WK, Coman R, Alici G. A Wearable Biofeedback Device to Increase Gait Swing Time Could Have Positive Effects on Gait among Older Adults. *Sensors*. 24 déc 2021;22(1):102.
69. A Non-Invasive Medical Device for Parkinson's Patients with Episodes of Freezing of Gait - PubMed [Internet]. [cité 5 juin 2023]. Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30759789/>
70. Thaut MH, Rice RR, Braun Janzen T, Hurt-Thaut CP, McIntosh GC. Rhythmic auditory stimulation for reduction of falls in Parkinson's disease: a randomized controlled study. *Clin Rehabil*. janv 2019;33(1):34-43.
71. Arias P, Cudeiro J. Effect of rhythmic auditory stimulation on gait in Parkinsonian patients with and without freezing of gait. *PLoS One*. 22 mars 2010;5(3):e9675.
72. Lim J, Lim T, Lee J, Sim J, Chang H, Yoon B, et al. Patient-specific functional electrical stimulation strategy based on muscle synergy and walking posture analysis for gait rehabilitation of stroke patients. *J Int Med Res*. mai 2021;49(5):030006052110167.

73. Kandilakis C, Sasso-Lance E. Exoskeletons for Personal Use After Spinal Cord Injury. *Arch Phys Med Rehabil.* févr 2021;102(2):331-7.
74. Chen B, Ma H, Qin LY, Gao F, Chan KM, Law SW, et al. Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons. *J Orthop Transl.* avr 2016;5:26-37.
75. Plaza A, Hernandez M, Puyuelo G, Garces E, Garcia E. Lower-Limb Medical and Rehabilitation Exoskeletons: A Review of the Current Designs. *IEEE Rev Biomed Eng.* 2023;16:278-91.
76. Hartigan C, Kandilakis C, Dalley S, Clausen M, Wilson E, Morrison S, et al. Mobility Outcomes Following Five Training Sessions with a Powered Exoskeleton. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.* 2015;21(2):93-9.
77. Kozlowski AJ, Fabian M, Lad D, Delgado AD. Feasibility and Safety of a Powered Exoskeleton for Assisted Walking for Persons With Multiple Sclerosis: A Single-Group Preliminary Study. *Arch Phys Med Rehabil.* juill 2017;98(7):1300-7.
78. Rodríguez-Fernández A, Lobo-Prat J, Tarragó R, Chaverri D, Iglesias X, Guirao-Cano L, et al. Comparing walking with knee-ankle-foot orthoses and a knee-powered exoskeleton after spinal cord injury: a randomized, crossover clinical trial. *Sci Rep.* 9 nov 2022;12(1):19150.
79. Meng Q, Zeng Q, Xie Q, Fei C, Kong B, Lu X, et al. Flexible lower limb exoskeleton systems: A review. *NeuroRehabilitation.* 2022;50(4):367-90.
80. Yao J, Sado T, Wang W, Gao J, Zhao Y, Qi Q, et al. The Kickstart Walk Assist System for improving balance and walking function in stroke survivors: a feasibility study. *J Neuroengineering Rehabil.* 24 févr 2021;18(1):42.

Université de Lille
FACULTE DE PHARMACIE DE LILLE
DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE
Année Universitaire 2023/2024

Nom : Vasseur
Prénom : Gwendoline

Titre de la thèse : Difficulté à la mobilité : prise en charge par des dispositifs médicaux et innovation

Mots-clés : Dispositifs médicaux, difficulté à la mobilité, Aide à la marche, Innovation

Résumé :

Avec le vieillissement de la population et le contexte mondiale, la mobilité est un enjeu important en particulier pour les années à venir. Les troubles de la mobilité pouvant fortement impacter la vie des personnes, une prise en charge thérapeutique est nécessaire. Cette prise en charge peut être réalisée grâce à des dispositifs médicaux qui sont présents sur le marché des produits de santé. Ces dispositifs d'aide à la mobilité font l'objet depuis plusieurs années de recherches et d'innovation scientifiques et technologiques.

Membres du jury :

Président : Monsieur Blanchemain, Nicolas, Professeur des Universités, Pharmacotechnie industrielle

Directeur, conseiller de thèse : Monsieur Blanchemain, Nicolas, Professeur des Universités, Pharmacotechnie industrielle

Membre extérieur 1 : Madame Trépart Florence, Docteur en Pharmacie, Responsable Technique Médicaments et Dispositifs Médicaux chez EFOR

Membre extérieur 2 : Monsieur Silvie Jean-Philippe, Docteur en Pharmacie, Pharmacien Titulaire à Pharmacie du Théâtre