



UNIVERSITÉ DE LILLE
FACULTÉ DE MÉDECINE HENRI WAREMBOURG
Année : 2024

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MÉDECINE

**Intérêt de l'imagerie motrice dans la rééducation à la marche de la
personne amputée trans-tibiale d'origine vasculaire : réalisation
d'un protocole d'étude interventionnelle, contrôlée et randomisée**

Présentée et soutenue publiquement le 10 octobre 2024 à 18h00
au Pôle Formation
par **Jordan ESTERMANS**

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Vincent TIFFREAU

Assesseurs :

Monsieur le Docteur Paul POTEL

Monsieur le Docteur Benoît LADRETTE

Directeur de thèse :

Monsieur le Docteur Alexandre RIMETZ

AVERTISSEMENT

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

SIGLES

AMMI : Amputation Majeure de Membre Inférieur

AMS : Aire Motrice Supplémentaire

AFM : Analyse Fonctionnelle de la Marche

AQM : Analyse Quantifiée de la Marche

AOMI : Artériopathie Oblitérante des Membres Inférieurs

AVC : Accident Vasculaire Cérébral

BPCO : Broncho-Pneumopathie Chronique Obstructive

CPAM : Caisse Primaire d'Assurance Maladie

HAS : Haute Autorité de Santé

IM : Imagerie Motrice

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

M1 : Cortex Moteur Primaire

MMSE : *Mini-Mental State Examination*

NSN : Nombre de Sujets Nécessaires

PMSI : Programme de Médicalisation du Système d'Information

PME : Potentiels Evoqués Moteur

PP : Pratique physique

SNC : Système Nerveux Central

TDMI : *Time Dependant Motor Imagery*

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
A. Première partie : Généralités sur l'amputation de membre inférieur.....	1
1 Définitions	1
2 Epidémiologie.....	2
3 Etiologies.....	3
4 Comorbidités et surmortalité	5
5 Facteurs de corrélation avec la qualité de vie	7
6 Prise en charge : de la chirurgie à la rééducation	7
6.1 Principes chirurgicaux.....	7
6.2 Principes rééducatifs.....	10
6.3 Phase Pré-Prothétique.....	11
6.3.1 Cicatrisation et gestion du moignon	11
6.3.2 Lutte contre les attitudes vicieuses	12
6.3.3 Travail d'équilibre, renforcement musculaire et préparation à l'autonomie	12
6.4 Phase Prothétique.....	13
6.4.1 Choix de l'appareillage.....	13
6.4.2 Formation à l'utilisation de la prothèse.....	14
6.4.3 Autonomie dans les transferts et amélioration de l'équilibre	14
6.5 Phase de Réadaptation et de Suivi	15

6.5.1	Marche avec prothèse :.....	15
6.5.2	Entraînement aux activités supérieures de la marche.....	15
6.5.3	Permissions thérapeutiques et adaptations du domicile	15
6.5.4	Suivi post-rééducation.....	16
7	Amputation trans-tibiale et appareillage	16
7.1	Pieds SACH (pied non articulé).....	18
7.2	Pieds articulés	18
7.3	Pieds à restitution d'énergie	19
7.4	Pieds avec micro processeurs	20
8	Spécificités de la marche de la personne amputée	20
9	Amputation et plasticité cérébrale	23
B.	Deuxième partie : Généralités sur l'imagerie motrice	25
1	Définitions	25
1.1	Imagerie mentale	25
1.2	Distinction imagerie mentale / imagerie motrice.....	26
2	Corrélations neurophysiologiques entre l'imagerie mentale et le mouvement réel	29
2.1	Chevauchement de substrats neuronaux entre IM et pratique physique (PP).	29
2.2	Au niveau cortico-spinal	32
2.3	Implication du système végétatif	33
2.4	La chronométrie mentale.....	34

3	Facteurs influençant l'équivalence neurofonctionnelle	35
3.1	Influence du type d'imagerie motrice (kinesthésique et visuel)	35
3.2	Influence du niveau d'expertise	36
3.2.1	Niveau d'expertise en IM.....	36
3.2.2	Niveau d'expertise physique	37
4	Théorie des modèles internes du mouvement	37
5	Impact de l'imagerie motrice sur la plasticité cérébrale	39
6	Méthodes d'évaluations des capacités d'imagerie motrice.....	42
6.1	Faisabilité de l'IM chez le patient amputé.	43
6.2	Principales méthodes d'évaluation de l'IM	43
6.2.1	Tests de latéralité.....	43
6.2.2	Tests de qualité d'imagerie	44
6.2.2.1	MIQ-RS : Movement Imagery Questionnaire – Revised Second Version 44	
6.2.2.2	KVIQ : Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire	45
6.2.3	VGPT et C-VRFT	46
6.2.4	Tests de chronométrie mentale.....	47
7	Règles de bonne pratique en imagerie motrice	48
8	Impact de l'imagerie motrice lors de la rééducation à la marche dans la littérature.	54
8.1	Chez le sujet hémiparétique post AVC.....	54
8.2	Chez le sujet amputé.	56

OBJECTIFS.....	62
1 Objectif principal de l'étude	62
2 Objectifs secondaires de l'étude.....	62
Matériel et méthode.....	64
1 Design expérimental et localisation	64
2 Stratégie de recrutement et population	64
3 Critères d'éligibilité	65
3.1 Critères d'inclusion.....	65
3.2 Critères de non inclusion.....	65
3.3 Critères de sortie d'étude précoce	66
4 Randomisation et Aveugle	67
5 Critères de jugement.....	67
5.1 Critère de jugement principal	67
5.2 Critères de jugement secondaires.....	70
6 Statistiques.....	77
6.1 Nombre de sujets nécessaires	77
6.2 Méthodologie statistique	78
6.2.1 Analyse principale.....	78
6.2.2 Analyses secondaires	79
7 Déroulement de l'étude	80
7.1 Schéma de l'étude	80
7.2 Visite de pré-inclusion (pré-T0)	81

7.3	Tests de faisabilité	82
7.4	Visite d'inclusion (T0)	83
7.5	Première phase de tests (T1)	84
7.6	Deuxième phase de tests (T2)	85
7.7	Troisième phase de tests (T3)	87
8	Protocole d'imagerie motrice	88
8.1	Phase 1 (travail qualitatif du schéma de marche) : Séances 1 à 3.....	92
8.2	Phase 2 (travail quantitatif et qualitatif du schéma de marche) : Séances 4 à 7	101
8.3	Phase 3 (Travail des transferts) : Séances 8 et 9	112
8.4	Phase 4 (Travail des activités supérieures de la marche et mises en situation de la vie quotidienne) : Séances 10 à 12.....	117
9	Protocole de relaxation : Méthode Jacobson	125
	Discussion	127
1	Justification des choix méthodologiques	128
1.1	Phase d'imagerie motrice en période pré prothétique ?	128
1.2	Randomisation	131
1.3	Justification des analyses en sous-groupe.....	131
1.4	Choix de la relaxation comme tâche témoin.....	134
1.5	Choix du bilan cognitif et des tests de faisabilité	134
2	Justification des critères d'évaluation	135
2.1	Choix du test de marche de 2 minutes	135

2.2	Choix du L-Test.....	136
2.3	Choix des analyses en Analyse Fonctionnelle de la Marche.....	136
2.4	Choix du TAPES-R-F	137
2.5	Choix du questionnaire SIGAM-FR	137
3	Forces et limites de l'étude.....	138
3.1	Forces de l'étude.....	138
3.2	Limites et difficultés attendus de l'étude.....	140
4	Implications cliniques potentielles	142
5	Perspectives pour l'avenir	143
5.1	Perspectives pour l'avenir et idée d'un deuxième protocole	143
5.2	Vers une utilisation concomitante de la stimulation trans crânienne ? 145	
	Conclusion.....	147
	Bibliographie.....	148
	Annexes.....	156

INTRODUCTION

A. Première partie : Généralités sur l'amputation de membre inférieur

1 Définitions

L'amputation est définie par l'ablation totale ou partielle d'un membre. Les niveaux d'amputation sont multiples au membre inférieur, et sont définis en fonction de l'étiologie, du potentiel de cicatrisation et d'une volonté de préservation maximale des capacités fonctionnelles du membre résiduel (segment de membre restant) afin de favoriser l'autonomie du patient.

Nous pouvons citer 2 catégories de niveau d'amputation :

- Mineure : en dessous de la cheville
- Majeure : au-dessus de la cheville

Chaque niveau d'amputation présente ses propres spécificités en matière d'appareillage. Dans le contexte de cette thèse, nous nous concentrons sur le niveau transtibial, qui fait partie des amputations majeures du membre inférieur (AMMI), au même titre que les désarticulations du genou (y compris l'amputation de Gritti), les amputations transfémorales, les désarticulations de la hanche, et enfin, les hémipelvectomies.

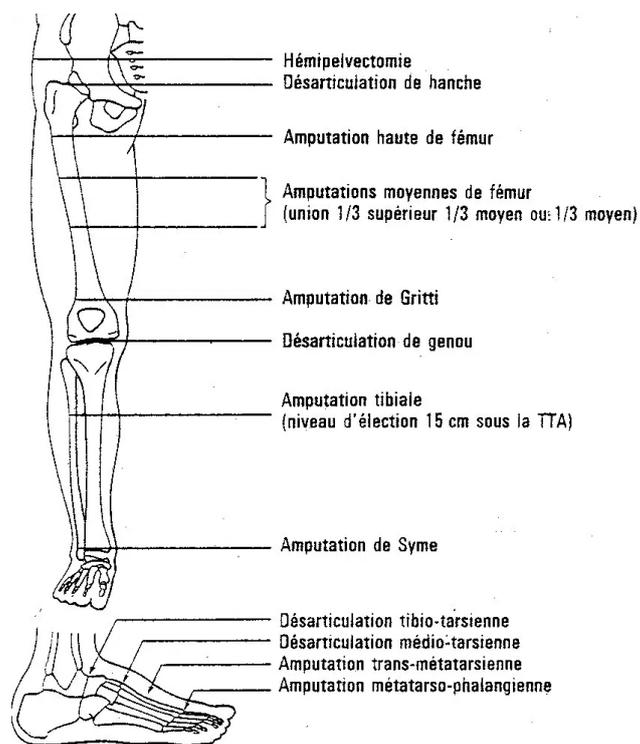


Figure 1. Représentation des différents niveaux d'amputation de membre inférieur. (D'après *Physiostudent*[1])

2 Epidémiologie

Il n'existe que très peu d'études sur la prévalence des amputations de membres inférieurs en France.

Fosse et al.[2] ont publié une étude en 2009 indiquant un nombre d'hospitalisation pour amputation de membre inférieur estimé à 17 551 durant l'année 2003 pour un total de 15 353 patients. Cela correspondait à une incidence annuelle de 26/100 000 habitants, tous niveaux d'amputation confondus.

Plus récemment, une étude publiée en mars 2023 par Bruyant et al.[3] indique qu'entre 2011 et 2020, un total de 116 866 amputations de membre inférieur ont été identifiées en France. Leur recueil de données a été réalisé par l'intermédiaire de la plateforme « scanscante.fr », appartenant à l'Agence technique de l'information sur l'hospitalisation et qui est associée à la base de données du Programme de médicalisation des

systèmes d'informations (PMSI).

Cette étude indique une incidence annuelle entre 11134 et 11969 amputations de membre inférieur par an.

Le niveau d'amputation le plus fréquent est l'amputation transfémorale, avec une incidence moyenne de 5,72 pour 100 000 habitants, soit environ 3 802 interventions réalisées chaque année. Elle est suivie de près par l'amputation transtibiale, qui présente une incidence moyenne de 5,57 pour 100 000 habitants, correspondant à environ 3 699 interventions annuelles. En troisième position se trouve l'amputation du médio-pied ou de l'avant-pied sans stabilisation de l'arrière-pied, avec un taux d'incidence de 5,50 pour 100 000 habitants, soit une moyenne de 3 659 interventions par an.

3 Etiologies

Pour reprendre l'étude précédemment citée de Fosse et al., les auteurs indiquent que l'étiologie vasculaire est la plus retrouvée, représentant 82.8%. La cause vasculaire comprend les pathologies artérielle (artériopathie oblitérante des membres inférieurs, AOMI) et les épisodes d'ostéite sur un état vasculaire précaire en lien avec le diabète (première place avec 52%).

Santé Publique France[4] indique qu'en 2004 et 2007, respectivement 10 265 et 11 442 actes d'amputation des membres inférieur ont été enregistrés en France chez les patients diabétiques, étiologie la plus fréquente d'amputation de membre inférieurs. Parmi elles, 3640 actes d'amputations transtibiales ont été recensés pour l'année

2007. Une même personne a effectué deux séjours avec amputation dans l'année dans 15 % des cas et trois séjours ou plus dans 4 % des cas.

Le taux d'incidence est 16 fois plus élevé dans cette population, et 2 fois plus élevé chez les hommes que chez les femmes.

Parmi les personnes diabétiques amputées en 2007, 29 % sont âgées de moins de 65 ans, 60 % ont entre 65 et 84 ans et 11 % ont 85 ans ou plus. (Santé publique France)

Localement, une étude réalisée par le Dr. Coisne dans le cadre de sa thèse d'exercice, réalisée entre 2013 et 2014 à l'hôpital Swynghedauw au CHRU de Lille dans le service de soins de suite et de réadaptation, révèle que 83% des amputations de membres inférieurs étaient d'origine vasculaire, dont 89% concernaient des patients diabétiques. Par ailleurs, 12% des amputations étaient d'origine oncologique et 5% avaient d'autres causes.

Chez nos voisins, la tendance est similaire. En Belgique, une étude menée par Oliveira et al. dans un centre de réadaptation à Bruxelles entre 2010 et 2012 incluant 42 amputations objectivait une majorité de sujets de sexe masculin (69,04 %), une moyenne d'âge de 52,4 ans, l'AOMI constituait la majorité des causes d'amputations avec 45,2 % des cas, suivis du diabète dans 35,6 % des cas et des traumatismes 9,52 %.

Une étude canadienne [5] révélait qu'entre 2006 et 2011, les amputations les plus fréquentes, parmi une population de 44 430 personnes, étaient reliées aux causes suivantes, souvent mélangées : Diabète (65,4 %), maladies vasculaires dont l'AOMI (25,6 %), accidents traumatiques (6,0 %), cancer (1,8 %) et maladies congénitales (0,6

%).

Quant aux pays en développement ou en situation de guerre, les causes les plus fréquentes sont traumatiques. En effet, dans les zones de guerre ou d'après-guerre, le plus grand nombre d'amputations résulte des combats et des explosions de mine terrestres. Dans les pays en voie de développement, les accidents de circulation et de travail dominant amplement.[6]

4 Comorbidités et surmortalité

En se concentrant sur l'étiologie vasculaire abordée dans cette thèse, on observe un profil de patients relativement homogène, marqué par de nombreuses comorbidités, en particulier d'ordre cardiovasculaire : âge élevé, hypertension artérielle, diabète, cardiopathie ischémique, accident vasculaire cérébral, insuffisance cardiaque chronique et insuffisance rénale chronique.

Une large étude rétrospective réalisée aux Etats-Unis par Kalbaugh et al.[7] chez l'ensemble des patients ayant bénéficié d'une AMMI dans le pays entre 2000 et 2016 objectivait 72% d'étiologie vasculaire avec, en terme de comorbidité, une prévalence prépondérante du diabète dans 61.1% des cas, puis vient l'hypertension artérielle (37.1%), les coronaropathies (29.9%), l'insuffisance cardiaque chronique (23.8%), l'insuffisance rénale chronique (23%) la broncho-pneumopathie chronique obstructive (15.8%) et enfin une maladie cérébrovasculaire avec dans la majorité des cas un accident vasculaire cérébral (8.6%).

Le taux de mortalité demeure important chez les patients dans les suites d'une amputation, mais varie énormément dans la littérature, globalement entre 39 à 68% à 5 ans selon une revue de Singh et Prasad[8]. Ces derniers ont également mis en évidence une mortalité accrue associée d'une part à l'antécédent diabétique (RR à 7.16), d'autre part à l'absence de prothésisation (RR à 5.84) de façon significative. Sur une analyse approfondie, ils ont également montré que le diabète et l'absence de mise en place de prothèse était des facteurs prédictifs indépendants de la mortalité à 3 ans.

Une revue systématique de la littérature réalisée par MESHKIN et son équipe[9] en 2021 (Etats-Unis) rapporte des taux de mortalité à 1 an, 3 ans, 5 ans et 10 ans de respectivement 33%, 53%, 64% et 80% après amputation de cause non traumatique.

Cependant, une récente étude rétrospective réalisée aux Etats-unis et publiée en 2023 par Beeson et al indique des taux de mortalité pour les AMMI à 1an et 5 ans respectivement de 12,47 % et 18,11% dans une population vasculaire. Ils indiquent également que les moyennes pondérées retrouvées dans la littérature antérieure étaient respectivement de 47,93 % et 60,60 %.

Les auteurs attribuent cette variabilité du taux de mortalité au fait que de nombreuses études antérieures, menées entre les années 1990 et 2000, reflètent une époque où l'AOMI était moins bien prise en charge, notamment en raison d'une faible utilisation des statines, dont l'usage s'est depuis considérablement accru. Ils soulignent également les progrès réalisés dans les soins des plaies, contribuant à une prise en charge globale plus efficace des artériopathies chroniques.

Cela porte à croire que la mortalité a tendance à baisser, mais elle n'en reste pas moins relativement importante par rapport à la population générale.

Par ailleurs, Dillingham[10] a constaté que les personnes recevant une réadaptation en milieu hospitalier avaient une meilleure survie que celles recevant une réadaptation en milieu communautaire.

5 Facteurs de corrélation avec la qualité de vie

La chirurgie d'amputation de membre inférieur constitue une problématique majeure en matière de rééducation, affectant significativement la capacité de marche et la qualité de vie des patients. Une revue systématique de la littérature publiée en 2017 par Davie-Smith et al.[11] indiquait que la marche avec prothèse est le facteur le plus impactant sur la qualité de vie des patients amputés d'origine vasculaire. Van Der Schans et al.[12] indiquaient par l'intermédiaire d'une étude transversale portant sur 437 patients que les déterminants les plus importants étaient d'une part la distance de marche, d'autre part la gestion des douleurs et notamment celles du membre fantôme.

De manière générale, la qualité de vie dépend également des possibilités de préserver des relations sociales[13]. Dans une population vieillissante, fragilisée par des comorbidités fréquentes, la mobilité du patient amputé apparaît comme un enjeu majeur dans les suites du geste chirurgical (facteur influençant la morbi-mortalité, qualité de vie, autonomie, coût de santé publique...).

6 Prise en charge : de la chirurgie à la rééducation

6.1 Principes chirurgicaux

L'objectif principal de cette chirurgie est d'obtenir un moignon de qualité optimale afin de pouvoir envisager le meilleur appareillage possible, tout en correspondant au projet de vie du patient. Le niveau d'amputation est décidé en fonction de l'état des tissus mous (état d'oxygénation des tissus en cas de cause ischémique) et osseux, et des capacités d'appareillage. La communication préopératoire entre chirurgien et médecin rééducateur est primordiale.

En ce qui concerne les amputés trans-tibiaux, la longueur optimale se situe entre le tiers supérieur et le tiers moyen, endroit où le galbe du mollet est le plus marqué par ailleurs. Il est préférable d'avoir un moignon long car la surface de répartition des appuis sera plus étendue et la pression cutanée sera moindre. Un moignon trop court entraînera une diminution du bras de levier pour activer la prothèse et par conséquent une dépense énergétique supplémentaire. Au contraire, un moignon trop long entraînera des difficultés d'appareillage en raison d'un espace insuffisant pour les différentes parties de la prothèse (manchon, emboiture, tube de liaison et pied prothétique).[14]

On recherche un moignon tonique, sensible et indolore. Pour arriver à cela, il existe des principes chirurgicaux à respecter :

- Peau épaisse et sensible, par réalisation d'une fermeture de la plaie en 1 temps, une cicatrisation dirigée, une localisation de la cicatrice frontale et paraterminale plutôt postérieure. Cette cicatrice doit systématiquement être décalée par rapport à l'extrémité osseuse.
- Absence d'appui osseux douloureux par l'intermédiaire de :
 - o La réalisation d'un angle de Farabeuf (rabotage de la partie antérieure et

distale du tibia selon un angle d'environ 30-35°) afin d'éviter une saillie osseuse sous cutanée potentiellement traumatique en regard d'une zone d'appui contre l'emboiture

- Une section plus courte de la fibula d'environ 2 cm par rapport au tibia
 - Une obturation du canal médullaire et suture périostée, surtout pour éviter la néo-ostéogénèse à l'origine d'ostéophytes pouvant gêner l'appareillage un peu plus à distance
 - La réalisation d'une ostéomyoplastie (remodelage des extrémités osseuses et utilisation des lambeaux musculaires pour recouvrir et protéger l'os amputé)
- Un moignon indolore avec réalisation d'une traction et section nerveuse la plus haute possible notamment pour éviter l'apparition de névromes.
 - Une ligature distale des vaisseaux sanguins.

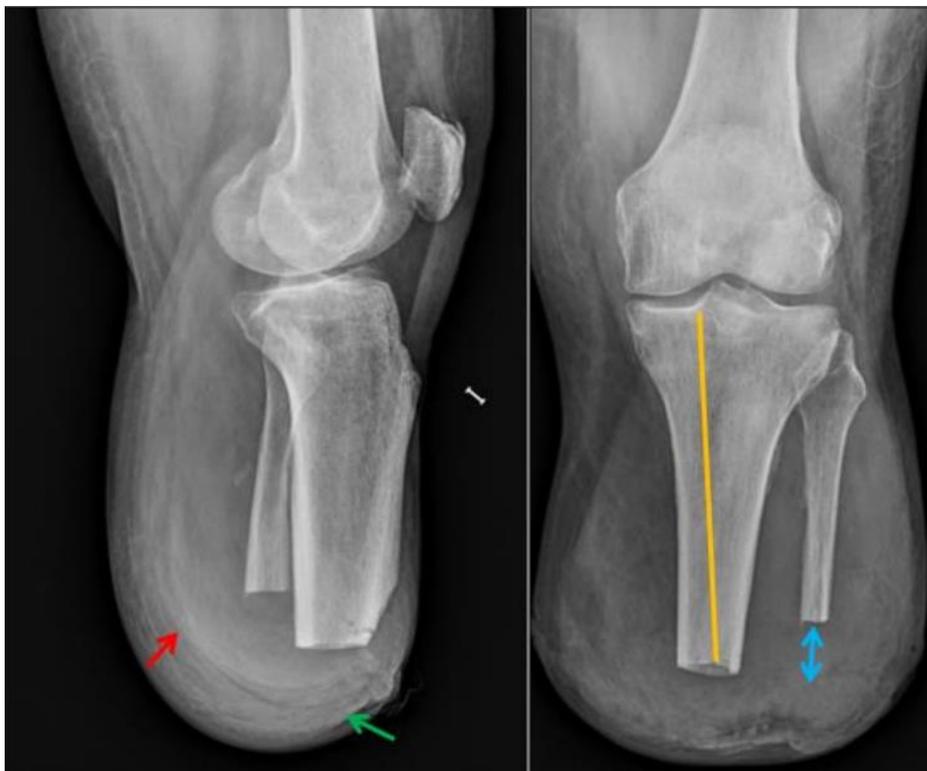


Figure 2. Radiographies d'une amputation trans-tibiale. (D'après l'ESSR 2023[15])

Cette image représente une radiographie de moignon (face et profil) suite à une amputation transtibiale droite. On remarque l'angle de Farabeuf à l'extrémité distale du tibia sur le profil.

- Flèche rouge : Myoplastie permettant une bonne couverture musculaire
- Flèche bleu : Fibula plus courte de 2 cm
- Ligne jaune : Longueur du tibia depuis son plateau, devant être d'au minimum 8cm
- Ligne verte : Œdème sous cutanée distale dû à une complication locale non précisée.

6.2 Principes rééducatifs

La rééducation des patients amputés d'origine vasculaire est un processus dont il existe peu de recommandation, la plupart basées sur des recommandations d'expert basées sur la pratique, avec tout de même une volonté de standardisation de leur prise en charge. La Haute Autorité de Santé (HAS)[16] a publié en 2006 des recommandations concernant la prise en charge des amputés d'étiologie artérielle. La prise en charge se doit d'être pluridisciplinaire avec la participation conjointe des médecins rééducateurs, les chirurgiens orthopédiques ou vasculaires, le médecin généraliste, médecins de la douleur, kinésithérapeutes, ergothérapeutes, psychomotriciens, psychologues, assistants sociaux, ortho-prothésistes, infirmiers, aide-soignants, etc.

Cette rééducation se déroule en trois phases essentielles : la phase pré-prothétique, la phase prothétique, et enfin la phase de réadaptation, visant à préparer le retour à

domicile dans des conditions optimales.

Il serait pertinent d'inclure systématiquement une phase pré-amputation, où le médecin rééducateur collabore étroitement avec le chirurgien orthopédique ou vasculaire pour déterminer conjointement le niveau et la technique d'amputation optimale, en dehors des situations d'urgence. Cela permettrait au patient d'appréhender cette intervention de manière constructive et participer pleinement à la prise en charge qui nécessite un investissement durable.

6.3 Phase Pré-Prothétique

Cette phase initiale intervient immédiatement après l'amputation et joue un rôle important dans la préparation du patient pour les étapes suivantes. Elle permet de définir les capacités physiques du patients et de bilancer les freins à un éventuel appareillage. Elle comporte plusieurs objectifs clés :

6.3.1 Cicatrisation et gestion du moignon

L'objectif principal de cette phase est d'assurer une cicatrisation efficace du moignon. Une bonne cicatrisation est essentielle pour éviter les complications, telles que les infections ou les ulcérations, qui pourraient retarder la rééducation. Pour cela, une cicatrisation dirigée est souvent mise en place, accompagnée d'une compression contrôlée du moignon par l'intermédiaire d'un bonnet élasto-compressif, ou de bandes peha-haft (bandages auto-adhésifs). La compression permet de réduire l'œdème du moignon en majorant le drainage lymphatique, ce qui aide à lui donner une forme

adéquate pour le futur appareillage. La qualité du moignon est un facteur déterminant dans le confort et l'efficacité de la prothèse. La compression aide également à la cicatrisation par une meilleure circulation sanguine locale

6.3.2 Lutte contre les attitudes vicieuses

Le manque de mobilité pouvant entraîner un alitement prolongé est à proscrire. En effet cela favorise l'apparition d'attitudes vicieuses dont les principales sont :

- Varus équin en regard du pied et de la cheville controlatérale
- Flessum de genou, il faut proscrire la mise en place d'un coussin sous le genou souvent placé à tort par le patient pour être plus confortable et moins douloureux.
- Tendance au flessum, abduction et rotation externe de hanche homolatérale.

L'installation au fauteuil ainsi qu'au lit est primordial, réalisée avec l'aide de l'ergothérapeute. La kinésithérapie doit insister sur le travail d'amplitude articulaire.

6.3.3 Travail d'équilibre, renforcement musculaire et préparation à l'autonomie

Parallèlement à la cicatrisation, de nombreux axes peuvent être travaillés. Notons tout d'abord le travail de l'équilibre débutant assis en bord de lit puis debout entre les barres parallèles. Le renforcement musculaire global est essentiel, incluant les 4 membres dont celui amputé car les mécanismes compensatoires expliqués un peu plus loin nécessiteront une force considérable en regard de la cuisse et de la hanche, il est nécessaire notamment de lutter contre l'amyotrophie du quadriceps et des ischio-

jambiers, ainsi que des muscles glutéaux nécessaires à l'équilibre et la stabilisation.

Ce travail de renforcement s'accompagne d'un reconditionnement à l'effort progressif afin d'améliorer les capacités cardio-vasculaires du patient, aidant également à la circulation sanguine et la cicatrisation.

Cette phase inclut également un travail sur l'autonomie débutant par les retournements au lit ainsi que les transferts (lit fauteuil, fauteuil roulant-toilette, fauteuil roulant-chaise de douche ...), la toilette, les déplacements avec aide technique, l'habillage, et la toilette. L'objectif est de rendre le patient le plus indépendant possible avant même de recevoir sa prothèse.

6.4 Phase Prothétique

La phase prothétique commence une fois que la cicatrisation du moignon est suffisamment avancée et que le patient est physiquement et psychologiquement prêt à être appareillé. Cette étape conditionne la capacité du patient à retrouver une mobilité fonctionnelle :

6.4.1 Choix de l'appareillage

Le type de prothèse est choisi en fonction de plusieurs critères, incluant les capacités physiques du patient (force, mobilité, équilibre), ses attentes et projets de vie (par exemple, s'il souhaite reprendre une activité professionnelle ou pratiquer un sport), et l'évaluation globale du médecin rééducateur.

Le médecin prend en compte l'état général de santé du patient, ses antécédents

médicaux, et son niveau de motivation. Dans un premier temps, une prothèse provisoire est souvent utilisée. Cette prothèse permet au patient de s'habituer progressivement à l'appareillage, de vérifier la tolérance du moignon et d'apporter des ajustements si nécessaire avant la fabrication d'une prothèse définitive. Le moulage du moignon est réalisé par un orthoprothésiste pour créer l'emboiture adaptée au patient.

6.4.2 Formation à l'utilisation de la prothèse

Une fois l'appareillage mis en place, le patient doit apprendre à l'utiliser de manière efficace et sécurisée. Cette formation inclut des séances de rééducation spécifiques pour enseigner la gestion de la prothèse, comme la manière de la mettre en place, de l'ajuster, de l'entretenir, et de la retirer. Ces compétences sont importantes pour prévenir les complications liées à une mauvaise utilisation, telles que les irritations du moignon ou les douleurs.

6.4.3 Autonomie dans les transferts et amélioration de l'équilibre

L'apprentissage des transferts avec prothèse est une étape clé pour l'autonomie du patient, ainsi que le travail en position debout afin d'améliorer l'équilibre et la posture, en prenant garde à la rétropulsion du bassin reflétant généralement une peur de la chute. Le report de poids sera alors travaillé avec un travail proprioceptif associé prédominant du côté lésé, en regard des sensations au niveau de l'emboiture. Ce travail est généralement réalisé entre les barres parallèles.

6.5 Phase de Réadaptation et de Suivi

La phase de réadaptation est l'étape finale du processus de rééducation et vise à permettre au patient de retourner à son domicile avec un maximum d'autonomie.

6.5.1 Marche avec prothèse :

Au cours de cette phase, le patient est encouragé à initier la marche avec prothèse entre les barres parallèles, puis à en sortir progressivement par l'intermédiaire d'aides techniques dans un premier temps comme un déambulateur, deux cannes anglaises (béquilles) ou une seule avec pour objectif à terme la non utilisation de ces dernières. Cette transition est progressive et dépend des capacités fonctionnelles du patient, ainsi que de sa confiance en lui-même.

6.5.2 Entraînement aux activités supérieures de la marche

Une fois que le patient maîtrise la marche sur terrain plat, la rééducation se concentre sur des activités plus complexes. Cela inclut la montée et la descente des escaliers, la marche sur des terrains accidentés, et d'autres tâches nécessitant une coordination avancée et une bonne gestion de l'équilibre. Ces exercices sont essentiels pour permettre au patient de naviguer en toute sécurité dans des environnements variés.

6.5.3 Permissions thérapeutiques et adaptations du domicile

Des permissions thérapeutiques, qui consistent en des retours temporaires à domicile, sont souvent accordées pour évaluer les difficultés que le patient pourrait rencontrer

dans son environnement habituel. Ces permissions, alliées aux visites à domicile généralement effectuées par les ergothérapeutes, permettent d'identifier les obstacles potentiels et de planifier des adaptations du domicile si nécessaire. Cela peut inclure l'installation de rampes, l'élargissement des portes pour le passage de la prothèse, ou la réorganisation des meubles pour faciliter les déplacements.

6.5.4 Suivi post-rééducation

Le suivi est une étape essentielle pour s'assurer que le patient s'adapte bien à son appareillage et pour apporter les ajustements nécessaires. Quelques semaines après la sortie, une consultation de suivi est généralement prévue. Cette consultation permet d'évaluer l'ajustement de la prothèse définitive, de vérifier l'évolution du moignon, et de réajuster le programme de rééducation en libéral si nécessaire. Ce suivi continu permet de prévenir les complications à long terme et assurer une adaptation optimale du patient à sa nouvelle condition.

7 Amputation trans-tibiale et appareillage

L'amputation entraîne des altérations des fonctions musculaires au niveau du membre résiduel. Les muscles du moignon, notamment le tibial antérieur, le gastrocnémien médial et latéral, ainsi que le soléaire, subissent une atrophie marquée (lié à la perte d'attache distale). Des techniques chirurgicales comme l'ostéomyoplastie citée précédemment tentent de réduire au maximum cette atrophie. Malgré cela, ces muscles continuent à jouer un rôle important dans le maintien de l'emboîture lors de la marche. En outre, une amyotrophie des ischio-jambiers et surtout des quadriceps est

observée chez les patients amputés transtibiaux, ce qui réduit directement la force musculaire disponible [17].

Cette diminution de force entraîne une asymétrie significative entre le côté amputé et le côté controlatéral, en particulier au niveau des extenseurs (quadriceps) et fléchisseurs (ischio-jambiers) du genou, ainsi que des abducteurs de la hanche (muscles glutéaux).

Une prothèse tibiale est composée de :

- Un manchon qui se met directement sur la peau. Il est soit en mousse, soit en gel (copolymère, silicone, tramé ou non, polyuréthane)
- Une emboiture : partie rigide dans laquelle va se loger le moignon
- Un tube de jonction, permettant de compenser la hauteur du membre résiduel
- Un pied

Les patients amputés trans-tibiaux sont équipés de pieds prothétiques permettant pour certains modèle de compenser certaines fonctions perdues. Selon leurs performances, certains pieds remplissent plusieurs rôles essentiels :

- absorber le choc à l'attaque du talon,
- permettre le déroulement du pas en autorisant l'avancée du tibia par rapport au pied,
- Restituer de l'énergie en fin de phase d'appui pour mimer une propulsion et faciliter le passage du pas
- relever le pied en phase oscillante pour faciliter le passage du pas.

Les pieds prothétiques sont classés en différentes catégories selon leurs fonctions. Le choix du pied sera déterminé par les capacités fonctionnelles du sujet, par exemple sa capacité à marcher en dehors du domicile ou sur des terrains accidentés. Plus les capacités fonctionnelles prévisibles sont importantes, meilleur sera la classe de pied choisi.

Cette prescription est réalisée par le médecin MPR sur une ordonnance de grand appareillage avec demande d'entente préalable auprès de la CPAM (Caisse Primaire d'Assurance Maladie).

7.1 Pieds SACH (pied non articulé)

Les pieds dits conventionnels, comme le pied SACH (Solid Ankle Cushion Heel), sont composés d'une âme en bois rigide et d'un talon en mousse, n'offrant pas de mobilité au niveau de la cheville. Il est réservé aux patients ayant une faible activité, ou peut servir de façon provisoire lors du début de travail avec prothèse.

On retrouve des talons de dureté variable permettant l'absorption des chocs et un avant pied souple pour le passage du pas.

7.2 Pieds articulés

D'autres types, les pieds articulés, permettent des mouvements dans le plan sagittal ou sagittal et frontal grâce à des articulations uniaxiales (plan sagittal, permettant la flexion plantaire et dorsale) ou multiaxiales (ajoutant le plan frontal, ajoutant des mouvements d'inversion et d'éversion).

7.3 Pieds à restitution d'énergie

Les pieds à restitution d'énergie, dits dynamiques, permettent un mouvement du tibia par rapport au pied via la déformation du matériau, restituant ainsi l'énergie emmagasinée lors de l'appui pour une propulsion améliorée. Ces pieds dynamiques peuvent être associés à des dispositifs supplémentaires tels qu'une articulation de cheville, un amortisseur de chocs ou un absorbeur de torsion.

Le comportement de ces pieds peut être caractérisé par leur raideur, qui relie l'effort appliqué au déplacement obtenu. Par exemple, la raideur de l'arrière-pied influence la quantité d'énergie emmagasinée à l'attaque du pas, tandis que celle de l'avant-pied détermine l'énergie restituée à la propulsion.

Il en existe 4 types répertoriés en « classe » :

Classe 1 : Pied peu fonctionnel et mobile, principalement destiné à un usage intérieur ou à proximité de bâtiments.

Classe 2 : Pied stable et dynamique, permet un usage intérieur et extérieur à distance de bâtiments (activité physique modérée).

Classe 3: Pied plus dynamique mais moins stable, nécessite un projet de vie nécessitant l'utilisation de ce type de pied pour pouvoir être utilisé (activité physique importante).

Classe « spéciale » : La lame de course, destinée à une activité sportive. La composition de ce type de pied permet d'obtenir une légèreté remarquable tout en

restituant la quasi-totalité de l'énergie transmise.

7.4 Pieds avec micro processeurs

Enfin, des pieds prothétiques technologiquement plus avancés ont été développés. Ces pieds incluent des blocs hydrauliques, comme dans les modèles Echelon (Endolite), Motion Foot (Fillauer) et Kinterra (Freedom), et parfois des microprocesseurs pour contrôler ces blocs, comme dans les pieds Elan (Endolite) et Raize (Fillauer). D'autres modèles, comme le ProprioFoot (Ossur), ajustent la position neutre du pied pour s'adapter aux pentes. De plus, des recherches sont en cours sur des prothèses motorisées, appelées « powered ankle-foot prosthesis », qui visent à améliorer la propulsion, notamment lors de la montée d'escaliers.

En revanche, ils présentent certains défauts comme le poids qui est conséquent, un prix élevé et l'utilisation de batteries à recharger.

8 Spécificités de la marche de la personne amputée

L'une des difficultés de la rééducation de la marche réside dans le manque de synchronisation de la proprioception, car l'amputation entraîne la perte d'une grande partie des informations sensorielles acquises, rendant difficile l'adaptation aux forces exercées sur le membre résiduel pendant la phase d'appui.

La marche des personnes amputées présente des caractéristiques distinctes par rapport à celle des sujets sains, en raison des contraintes biomécaniques associées à

l'utilisation d'une prothèse. Ces caractéristiques incluent une vitesse de marche généralement plus lente, une augmentation du temps de la phase d'appui sur le côté non amputé, ainsi qu'une longueur de pas plus importante du côté prothétique. [18]

Cette asymétrie dans la démarche est souvent accompagnée d'une oscillation accrue du centre de masse vers le côté du membre intact [19]. Cela implique un coût énergétique plus important [20], en partie à cause des efforts supplémentaires nécessaires pour stabiliser le mouvement et pour compenser les différences de force et de contrôle entre le membre prothétique et le membre intact. [21]

Il est estimé une augmentation de la consommation énergétique de l'ordre de 40 % supplémentaires chez les amputés trans-tibiaux d'étiologie vasculaire en comparaison aux sujets sains, et de 100 % pour les trans-fémoraux vasculaires. [22]

Un des défis majeurs dans l'entraînement à la marche chez les patients amputés est de maintenir une longueur de pas égale entre les deux membres. Cette difficulté découle de l'asymétrie biomécanique inhérente à l'état d'amputation, qui affecte la manière dont les forces sont générées et réparties lors de la marche. La prothèse, bien qu'essentielle pour la mobilité, ne peut pas complètement reproduire les fonctions d'une jambe naturelle, ce qui crée des déséquilibres que les patients doivent continuellement gérer.

Par conséquent, les objectifs cliniques des procédures de rééducation à la marche chez les patients amputés se concentrent sur la réduction des oscillations excessives du centre de masse, la symétrie, la vitesse de marche, et par conséquent la diminution de la dépense énergétique.

Donker et Beek [23] ont par ailleurs mis en évidence l'amélioration de caractéristiques telles que la symétrie et la coordination à des vitesses de marche plus élevées, renforçant cette idée.

Gailey [24] a réalisé une revue de la littérature répertoriant les principales complications liées à l'asymétrie de marche qu'ont les personnes amputées de membre inférieur, ayant une répercussion négative sur les structures musculo-squelettiques et affectant leur mobilité ainsi que leur qualité de vie. Ceci étant principalement en lien avec une surutilisation du membre sain et par conséquent une sous-utilisation du membre lésé entraînant des contraintes biomécaniques.

Parmi ces complications, il est retrouvé des atteintes dégénératives telles que l'arthrose du genou et/ou de la hanche prédominant du côté sain ; l'apparition d'une ostéopénie voire d'une ostéoporose du côté lésionnel en raison de la diminution des contraintes par la diminution de la quantité et du temps d'appui ; des dorso-lombalgies d'horaire mécanique en rapport direct avec cette asymétrie de marche et souvent en lien également avec un mauvais ajustement ou alignement avec l'emboiture, des changements de posture fréquents ou une différence de longueur de jambe. L'ensemble de ces complications pouvant entrer dans un cercle vicieux de déconditionnement général.

En résumé, le rôle de la rééducation à la marche des personnes amputées de membre inférieur ne réside pas en la recherche d'une symétrie parfaite, mais plutôt d'une symétrie partielle. En effet, la symétrie parfaite est très difficilement réalisable dans cette population du fait des différences intrinsèques entre le membre sain et le membre

prothétique.

Le but est de retrouver une marche fonctionnelle et efficace, à une vitesse convenable, permettant des déplacements réalisés en sécurité, avec le minimum d'effort et en minimisant les inconvénients fonctionnels liés à l'asymétrie, tels que la fatigue accrue, les douleurs articulaires et les risques de complications à long terme cités précédemment.

9 Amputation et plasticité cérébrale

La plasticité cérébrale est définie par le Larousse comme l'aptitude des neurones à se transformer pour s'adapter à des modifications de leur environnement ou à des changements internes à l'organisme. Bruno Will (chercheur en neurobiologie à Strasbourg) la définit en 1982 comme « la capacité à réaliser de nouvelles fonctions en transformant de manière durable et sous la contrainte de l'environnement, soit les éléments qui constituent le cerveau soit le réseau de connectivité qui les unit [...], le fonctionnement cérébral d'un individu soumis à un excès ou à une carence de stimulation modifie sa structure, et par là même, le fonctionnement ultérieur de son cerveau ».

Les modifications neuronales induites par la stimulation du système nerveux telle que la pratique physique font parties d'un concept appelé plasticité activité-dépendante, par l'intermédiaire de la synaptogénèse (création de nouvelles synapses) par expansion de la surface dendritique.

Dans les suites d'une chirurgie d'amputation, la perte soudaine d'entrées sensorielles

et de cibles musculaires déclenche une réorganisation anatomique et fonctionnelle du système nerveux central, par le biais de la plasticité cérébrale qui est alors nommée dans ce cas précis de compensation spontanée. Citons deux principaux changements.

Premièrement, Jiang et al. [25] ont montré que les patients amputés d'un membre inférieur, comparés à des sujets sains, présentaient un amincissement cortical au niveau de la région prémotrice (PMC) controlatérale à l'amputation, ainsi que dans les zones visuomotrices. Cet amincissement était également associé à une réduction de la diffusion dans la substance blanche sous-jacente à la PMC controlatérale, suggérant des altérations structurelles et fonctionnelles liées à l'amputation.

Cela induit une extension de la représentation des muscles adjacents à la zone du membre amputé sur la zone corticale déafférenciée, signifiant que les régions corticales qui étaient initialement responsables de la sensation et du contrôle moteur du membre amputé peuvent être "envahies" par les représentations des muscles voisins [26] si l'on s'en réfère à l'homonculus de Penfield. Cette réorganisation peut contribuer à l'apparition de douleurs du membre fantôme ou algohallucinoïse. Il a notamment mis en évidence une corrélation positive entre douleur du membre fantôme et l'importance des réorganisations corticales observées dans le cortex somatosensoriel [27].

Deuxièmement, ces deux mêmes études [25,26] rapportent que l'intégrité des voies fibreuses reliant les PMC bilatéraux, traversant le corps calleux, ainsi que celles situées sous les régions visuo-motrices, a été significativement réduite chez les patients amputés. Ces résultats soutiennent l'hypothèse selon laquelle l'amputation peut entraîner des modifications des interactions interhémisphériques. Il est bien établi

que le mouvement unilatéral nécessite un traitement séquentiel impliquant les zones motrices des deux hémisphères, cela laisse suggérer une diminution des capacités neuromotrices secondaire.

Au total, l'amputation entraîne une diminution des capacités physiques, associée à une modification du schéma de marche et une réorganisation corticale appelée plasticité de compensation spontanée pouvant être délétère avec un rôle dans la survenue de l'algothallucinose et une diminution des capacités neuromotrices. Dans ce contexte, une technique de rééducation appelée imagerie motrice (IM) commence à être étudiée chez le patient amputé afin de venir compléter les programmes de rééducations actuels dans l'espoir d'en améliorer les résultats, sans induire de répétitions physiques dans une population potentiellement fatigable. La deuxième partie de cette introduction y sera dédiée.

B. Deuxième partie : Généralités sur l'imagerie motrice

1 Définitions

1.1 Imagerie mentale

L'imagerie mentale est un processus cognitif par lequel une personne crée, manipule ou évoque des images dans son esprit sans que ces images ne soient directement liées à des stimuli sensoriels présents. Elle peut concerner divers types de perceptions, comme les images visuelles, auditives, kinesthésiques, ou encore

olfactives. Prenons, par exemple, un joueur d'échecs qui anticipe les coups futurs : il imagine mentalement l'évolution de la position des pièces sur l'échiquier sans toucher une seule pièce. De même, un sculpteur peut visualiser dans son esprit la forme finale de son œuvre avant même de commencer à travailler le bloc de pierre, visualisant les courbes et les détails qui émergeront sous ses outils.

L'imagerie mentale joue ainsi un rôle dans la planification, la mémoire, et la résolution de problèmes. Elle permet à l'individu de "voir" des choses au sein même de son esprit, de "ressentir" des sensations, ou même de "prévoir" des actions futures dans un espace imaginaire. [28]

1.2 Distinction imagerie mentale / imagerie motrice

L'imagerie motrice est un type spécifique d'imagerie mentale, où l'accent est mis sur la représentation mentale des mouvements corporels. Lorsque l'on parle d'imagerie motrice, il s'agit de la capacité à imaginer l'exécution d'un mouvement ou d'une action sans réellement la réaliser. Cette forme d'imagerie comporte plusieurs modalités sensorielles pouvant être utilisées de façon conjointe ou non : visuelle (imaginez-vous en train de faire un geste), proprioceptive et kinesthésique (ressentez la position de vos membres et le mouvement de vos articulations), auditive (entendez les sons associés au mouvement), et parfois même tactile ou olfactive.

La perspective adoptée joue également un rôle clé : l'imagerie peut être interne (à la première personne, où le sujet se visualise en train d'exécuter l'action comme s'il la réalisait réellement) ou externe (à la troisième personne, où le sujet se voit lui-même comme un spectateur observerait une autre personne effectuer l'action).

En somme, si l'imagerie mentale englobe une variété de représentations non sensorielles, l'imagerie motrice se distingue par sa focalisation sur les mouvements corporels, intégrant différentes sensations sans que le mouvement soit réellement effectué.

Dans la littérature, l'imagerie motrice (IM) kinesthésique est généralement associée à une perspective interne, tandis que l'IM visuelle est souvent liée à une perspective externe. De nombreux chercheurs dans ce domaine ont tendance à limiter l'IM à une expérience en première personne, excluant ainsi l'imagerie visuelle externe [29,30].

Puyjarinet [30] décrit d'ailleurs l'IM comme « un état cognitif dynamique permettant un accès conscient au déroulement d'une action motrice et à ses caractéristiques temporelles, spatiales, proprioceptives et kinesthésiques, à partir d'une perspective égocentrée, sans qu'aucun mouvement ne soit réellement produit ».

Toutefois, Malouin [31] adopte une approche plus inclusive en considérant à la fois l'IM visuelle et kinesthésique comme des composantes essentielles de l'IM. Selon elle, l'IM kinesthésique ne peut s'effectuer qu'à travers une perspective interne, tandis que l'IM visuelle peut être vécue aussi bien sous une perspective interne qu'externe

L'ensemble des auteurs semblent toutefois en accord avec le fait que l'utilisation de l'IM kinesthésique à la 1ère personne est à privilégier [32], cependant l'utilisation de la perspective externe peut également être avantageuse en rééducation. Lorsqu'il s'agit de réaliser une action en imagerie motrice qui engage l'ensemble du corps et requiert une posture spécifique, il peut être pertinent de commencer par demander au patient de visualiser la coordination motrice depuis un point de vue externe. Cela permet de mieux comprendre la posture générale et les mouvements des différentes parties du

corps.

Initialement introduite et utilisée dans le domaine sportif depuis plusieurs décennies, l'imagerie motrice a pour objectif d'améliorer les performances des athlètes en perfectionnant la qualité, l'efficacité et la vitesse des mouvements. Elle est également utilisée dans la préparation mentale pour renforcer la confiance en soi et favoriser la rééducation après une blessure [33].

Pour ne citer que trois exemples dans le domaine sportif :

Hegazy et al. [34] ont montré une amélioration significative dans l'apprentissage du coup droit, du revers au tennis et de la passe poussée au hockey sur gazon.

Charrier et al. [35] ont montré dans le cadre d'une revue systématique de la littérature une amélioration des performances dans le domaine du football.

Guillot et al. [36] ont montré une amélioration du swing au golf après un entraînement par IM de 12 semaines. Fait intéressant supplémentaire, ces gains de performances se sont transférés au putting alors que ce geste n'avait pas été entraîné, laissant suggérer un perfectionnement moteur induit par l'IM capable de se transférer sur des gestes plus ou moins équivalents.

Avec les avancées en neurosciences, offrant une compréhension plus approfondie des processus neurophysiologiques impliqués dans l'imagerie motrice, cette technique a élargi son champ d'application. Elle est désormais utilisée comme outil de rééducation, notamment pour les patients atteints de lésions neurologiques et de façon plus récente chez le patient amputé.

2 Corrélations neurophysiologiques entre l'imagerie mentale et le mouvement réel

2.1 Chevauchement de substrats neuronaux entre IM et pratique physique (PP).

Nous savons à l'heure actuelle que l'imagerie motrice mobilise un ensemble de zones cérébrales relativement similaires à celles activées lors de l'exécution réelle d'un mouvement. Les principales régions concernées comprennent le cortex moteur primaire (M1), le cortex prémoteur ainsi que les aires motrices supplémentaires, qui sont essentiels pour la planification et l'initiation des mouvements [29,37]. Ces zones sont non seulement importantes pour l'exécution physique des mouvements, mais aussi pour leur représentation mentale.

Les parties de M1 activées lors de l'IM correspondraient aux représentations corticales des membres impliqués, respectant ainsi l'organisation somatotopique (Homunculus de Penfield) observée lors des mouvements réellement exécutés. [38]

Le cortex pariétal serait également activé [39] jouant dans l'intégration sensorimotrice et la représentation spatiale des mouvements [40], aidant à maintenir une perception cohérente du corps dans l'espace et serait impliqué dans la détection des perturbations sensorielles lors de l'anticipation de mouvements volontaires.

Le cortex cingulaire fortement connecté aux cortex moteur et pré-moteur, les ganglions de la base et le cervelet, ayant une implication dans la modulation et la coordination fine des mouvements, sont également activés lors de l'imagerie motrice [41].

Enfin, le cortex préfrontal est fortement sollicité, particulièrement dans l'aspect attentionnel et la gestion des processus cognitifs complexes nécessaires pour maintenir et manipuler les images mentales de mouvements.

Dans une méta-analyse réalisée en 2013 par Héту et al[42], il est donc mis en évidence l'activation systématique des régions suivantes lors de l'utilisation de l'IM : le gyrus pré frontal faisant partie du cortex pré moteur, les aires motrices supplémentaires, les lobules pariétaux supérieurs et inférieurs, le gyrus frontal inférieur faisant partie du lobe frontal et participant aux processus cognitifs complexes, le gyrus frontal moyen participant à la planification des mouvements. Au niveau sous cortical il est indiqué l'activation constante du cervelet, du thalamus, du putamen et du pallidum (ces deux derniers faisant donc partie des noyaux gris centraux impliquées dans la régulation des mouvements, ainsi que dans d'autres fonctions comme l'apprentissage des habitudes, la motivation et le contrôle émotionnel).

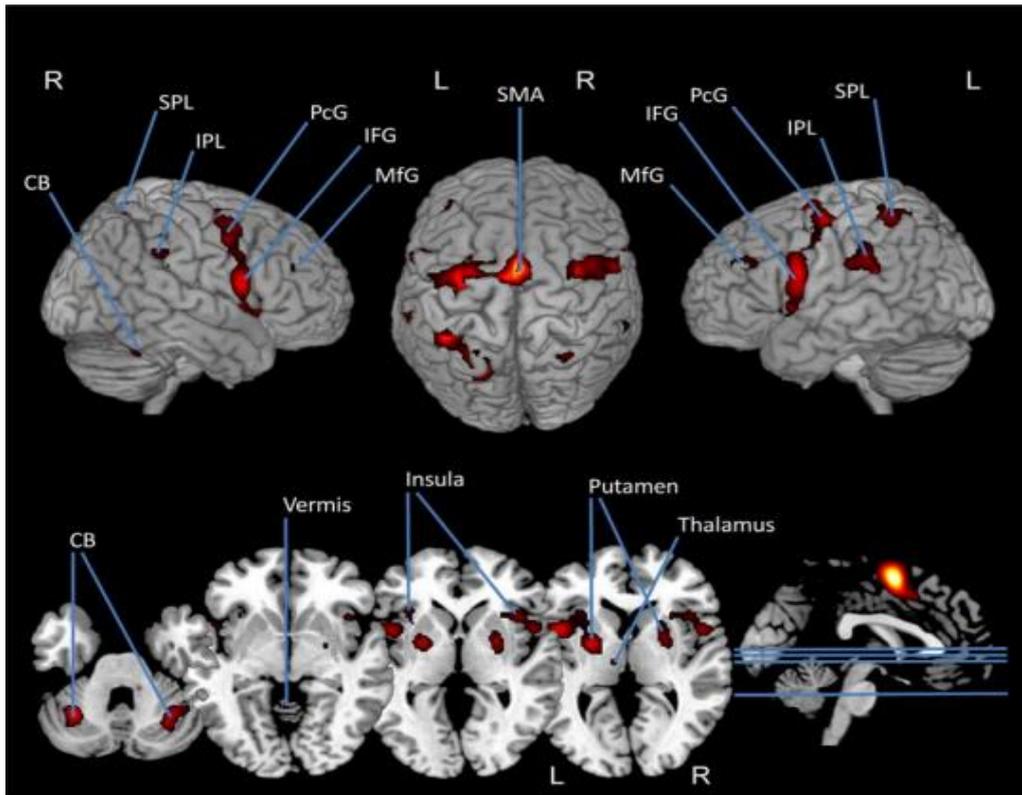


Figure 3. Représentation des régions activées de manière constante lors de l'imagerie motrice. CB : cervelet ; IPL/SPL : lobule pariétal inférieur/supérieur ; PcG : gyrus pré-central ; IFG : gyrus frontal inférieur ; MfG : gyrus frontal moyen ; SMA : aires motrices supplémentaires. (D'après Héту et al. [42]).

Si l'on s'intéresse aux patterns activés lors de la pratique de la marche, une technique de neuro-imagerie nommée spectroscopie par infra-rouge permet d'enregistrer l'activité corticale chez un sujet en mouvement. Lors d'une étude réalisée par Miyai et al. en 2001 [43], cette technique a permis de mettre en évidence une importante superposition des aires cérébrales activées lorsque les sujets marchaient sur un tapis roulant par rapport à quand ils s'imaginaient le faire. On note préférentiellement une activation des cortex moteurs primaires médians et des aires motrices supplémentaires.

Des études réalisées uniquement sur l'IM à la marche, par IRM fonctionnelle, ont mis en évidence une activation de réseaux neuronaux impliquant les régions corticales sensori-motrices et prémotrices, les lobules pariétaux supérieur et inférieur, les aires

motrices supplémentaire (AMS) et pré-supplémentaire ainsi que les noyaux gris centraux et le cervelet [44,45].

Bakker et al [44] ont notamment mis en évidence l'activation des lobules pariétaux supérieurs, des gyrus précentraux dorsaux et du gyrus occipital moyen droit lors de l'IM d'une tâche nécessitant de la précision (marche sur un chemin étroit comme une poutre) soulignant le rôle des structures corticales en dehors des régions motrices primaires dans l'imagination des mouvements de locomotion lorsqu'un positionnement précis du pied et un contrôle postural accru sont nécessaires. En effet, ces régions cérébrales sont impliquées dans des fonctions telles que la perception spatiale, la planification motrice, et l'intégration sensorimotrice. Ainsi, leur activation suggère qu'elles jouent un rôle clé dans la coordination complexe et la planification des mouvements, même en l'absence d'exécution physique.

En somme, l'équivalence neurofonctionnelle entre mouvement imaginé et exécuté est observée lors de la réalisation de tâches simples, mais également pour des séquences motrices plus complexes comme lors de la marche.

2.2 Au niveau cortico-spinal

La stimulation magnétique transcrânienne (TMS) a été utilisée pour explorer l'implication du système moteur dans l'imagerie motrice (IM), en évaluant l'excitabilité des voies corticospinales. Cette technique permet de mesurer les potentiels évoqués moteurs (PME) sur des muscles cibles en réponse à une stimulation du cortex moteur primaire (M1). De nombreuses études ont montré que l'imagerie motrice module l'excitabilité du système corticospinal. L'intensité des PME augmente spécifiquement

dans les muscles engagés dans le mouvement imaginé, sans affecter les muscles antagonistes, et cette facilitation est comparable à celle observée lors de l'exécution réelle du mouvement [46].

L'augmentation de l'excitabilité corticospinale pendant l'imagerie motrice est caractérisée par une spécificité spatiale (muscles impliqués), temporelle (timing de la contraction) et graduelle (intensité de la contraction) [47]. Cette modulation dépend du contexte environnemental, qui doit être compatible avec l'action imaginée. Par exemple, une posture du membre compatible avec le mouvement facilite l'excitabilité corticospinale, tandis qu'une posture incompatible la réduit [48].

Concernant l'origine de cette facilitation, la majorité des recherches suggère que l'augmentation des PME lors de l'imagerie motrice provient principalement d'une augmentation de l'excitabilité corticale plutôt que spinale, la voie réflexe restant généralement inchangée. Toutefois, certaines études ont observé une augmentation de l'excitabilité spinale, mesurée par le réflexe H, mais celle-ci était souvent associée à une légère activité électromyographique (EMG), indiquant que les sujets pourraient bouger légèrement pendant la tâche, ce qui remet en question l'interprétation de l'augmentation de l'excitabilité spinale comme étant due à l'imagerie motrice seule.

En conclusion, l'imagerie motrice engage les voies corticospinales, avec une modulation de l'excitabilité qui semble principalement d'origine corticale, et non spinale. Cependant, la boucle sensorimotrice reste incomplète, car aucun mouvement volontaire n'est produit, malgré une activité EMG parfois subliminale [47].

2.3 Implication du système végétatif

Bien que normalement indépendant du contrôle volontaire, le système nerveux autonome est également activé lors des tâches de simulation mentale de mouvement. Des études ont montré qu'à l'instar de l'exercice physique réel, une augmentation significative de la fréquence cardiaque et de la ventilation respiratoire survient lors de l'exercice de marche sur tapis roulant simulé mentalement (de l'ordre de 20 à 50% en comparaison à la marche réelle, à vitesse croissante). De plus, cette augmentation de l'activité autonome est étroitement corrélée à l'intensité de l'effort physique imaginé comme l'indique une étude de Decety et al. en 1991 [49]. De plus ils ont montré qu'il n'y avait aucune variation du métabolisme musculaire, mesuré par la phosphocréatine intramusculaire (PCr), pendant l'exercice physique imaginé.

De même, Gandevia et ses collaborateurs [50] ont observé une augmentation de l'activité cardiovasculaire chez des sujets paralysés lorsqu'ils imaginaient ou tentaient de contracter leurs muscles. Étant donné la paralysie complète de ces sujets, les changements observés dans l'activité autonome ne peuvent être attribués à une activité musculaire résiduelle.

Ces observations indiquent que les effecteurs végétatifs sont engagés lors des tâches d'imagerie motrice, renforçant l'idée d'une implication des structures centrales dans la programmation motrice. Ce phénomène pourrait représenter un mécanisme anticipatoire permettant de préparer la demande énergétique en réduisant le délai nécessaire à l'activation du système cardio-respiratoire.

2.4 La chronométrie mentale

La chronométrie mentale étudie la durée des processus mentaux, reposant sur le fait que les actions imaginées et exécutées sont réalisées en un timing similaire, obéissant par ailleurs à la loi de Fitts. Cette loi empirique a été formulée en 1954, décrivant une relation entre la difficulté de la tâche motrice et le temps nécessaire à la réaliser (plus la tâche est difficile, plus le temps nécessaire augmente). L'IM semble conserver une similarité temporelle avec le mouvement réel [51,52].

Decety et al. ont montré en 1989 [53] une similarité temporelle entre marche simulée et marche réelle. Par ailleurs cette même étude montre une sous-estimation du temps imaginée de l'ordre de 30% lors de la réalisation du même parcours de marche avec ajout d'un poids de 25kg sur les épaules, augmentant la difficulté de la tâche. Plus le mouvement à imaginer est complexe, plus la durée de l'imagerie doit être longue, tout comme pour un mouvement réel. Ainsi, la simulation mentale intègre les caractéristiques spatio-temporelles de la performance motrice.

Malouin explique que des études comparant la durée des mouvements lors de la marche réelle et en imagerie révèlent des temps similaires, même dans des situations complexes où les durées de pratique augmentent également [54]. Cela suggère que l'imagerie motrice ne se limite pas à une simple visualisation, mais mobilise les mêmes processus de planification et de contrôle moteur que ceux impliqués dans l'exécution réelle du mouvement

3 Facteurs influençant l'équivalence neurofonctionnelle

3.1 Influence du type d'imagerie motrice (kinesthésique et visuel)

Le type d'IM utilisé recruterait des aires cérébrales différentes. En effet, Guillot et al [55] ont étudié les régions cérébrales activées chez des sujets bon imageurs lors de tâches en imagerie visuelle versus kinesthésique. De multiples aires corticales étaient similaires, cela dit, des différences étaient notables. En effet, le type d'IM visuel a activé principalement les régions occipitales et les lobules pariétaux supérieurs, tandis que le type kinesthésique a produit plus d'activité dans les structures associées à la motricité et le lobule pariétal inférieur. Ces résultats suggèrent que ces deux modalités principales sont médiées par des systèmes neuronaux distincts, qui contribuent différemment aux processus d'apprentissage moteur et de rééducation.

3.2 Influence du niveau d'expertise

3.2.1 Niveau d'expertise en IM

La capacité d'imagerie motrice diffère d'un individu à l'autre, et cela a des répercussions sur les aires cérébrales activées. Guillot et al [56] ont réalisé une étude en 2008 cherchant à distinguer les différentes aires corticales activées lors d'une pratique d'imagerie mentale concernant une séquence de mouvements de doigts en fonction du niveau d'expertise de chacun, soit « bon » ou « mauvais » imageur. Les résultats obtenus par IRM fonctionnelles ont montré quelques différences significatives.

Les bons imageurs activaient davantage les régions prémotrices pariétales et ventrolatérales, qui sont connues pour jouer un rôle essentiel dans la génération d'images mentales. En revanche, les mauvais imageurs ont recruté le cervelet, le

cortex orbito-frontal et le cortex cingulaire postérieur. Par conséquent, cela peut se traduire par un plus grand effort neural afin de produire des images mentales en recrutant le système cortico-striatal ainsi que le système cortico-cérébelleux de façon plus importante.

L'IM cible donc des zones corticales plus précises et pertinentes lorsque la vivacité des images mentales est de bonne qualité. Cela a son importance car le niveau de progression à travers la pratique de l'IM semble sensiblement corrélé à la précision des représentations mentales effectuées [57].

3.2.2 Niveau d'expertise physique

Le niveau du pratiquant pour une certaine tâche peut également moduler les aires d'activations cérébrales durant la réalisation d'imagerie motrice. Pour le sujet sportif par exemple, Chang et al. [58] ont montré que les tireurs à l'arc experts activaient préférentiellement l'AMS, tandis que les novices activaient les régions prémotrice et frontale inférieure, l'AMS, les noyaux gris centraux, ainsi que le cervelet lors de l'IM d'un tir.

La littérature tend à dire qu'un niveau de pratique plus faible amène à l'activation d'aires plus diffuses, cela étant comparable au niveau d'expertise en imagerie.

4 Théorie des modèles internes du mouvement

Le modèle interne du mouvement est un concept central en neurosciences et en

psychologie cognitive, qui décrit comment le cerveau planifie, contrôle et apprend les mouvements du corps. Il repose sur des représentations internes des mouvements, permettant au système nerveux central (SNC) d'anticiper les conséquences sensorielles et motrices avant même que les actions ne soient réalisées. Selon les théories computationnelles, le cerveau fonctionne de manière similaire à un ordinateur, traitant les entrées sensorielles (comme la vision, l'audition et le toucher) pour produire des sorties motrices (les mouvements).

Il existe deux types de modèles internes : le modèle interne direct (ou prédictif) et le modèle interne inverse (ou contrôleur).

Le modèle interne direct prédit les conséquences d'un mouvement en générant une copie d'efférence avant l'exécution du mouvement, permettant de comparer les prédictions aux sensations réelles. Ce modèle se divise en deux parties selon Gueugneau et al [59] : le modèle direct dynamique, qui prédit l'état futur du système moteur en se basant sur l'état initial et la commande motrice prévue, et le modèle direct sensoriel, qui anticipe les conséquences sensorielles à partir de ces prédictions dynamiques.

Le modèle interne inverse, quant à lui, utilise les prédictions fournies par le modèle direct pour élaborer la commande motrice nécessaire, intégrant les informations sensorielles et motrices, ainsi que l'état actuel du corps et le but du mouvement. Ces modèles simplifiés permettent au SNC de gérer les nombreuses transformations nécessaires pour adapter la motricité aux contextes et aux objectifs spécifiques, en utilisant les connaissances du cerveau sur les lois physiques et la biomécanique du corps.

L'imagerie motrice s'appuierait sur ces modèles internes. En effet, lorsqu'une personne imagine un mouvement, le cerveau active des mécanismes similaires à ceux utilisés lors de la réalisation réelle du mouvement. Cela permet de renforcer les représentations internes et d'améliorer l'anticipation des mouvements futurs, jouant un rôle dans l'apprentissage moteur et la réhabilitation.

Selon Guillot [51], l'IM impliquerait donc l'élaboration centrale d'une commande motrice par le biais de cette phase d'anticipation, toutefois bloquée par des processus inhibiteurs au niveau cortical, cérébelleux et spinale.

L'imagerie motrice exploiterait ainsi le phénomène d'anticipation des modèles internes, permettant d'affiner les compétences motrices et d'optimiser les performances sans nécessiter d'exécution physique répétée.

5 Impact de l'imagerie motrice sur la plasticité cérébrale

Pascual-Leone et al. [60] ont été les premiers à montrer que l'IM peut induire une réorganisation corticale similaire à celle obtenue par l'entraînement physique, bien que de manière généralement moins prononcée. Dans leur étude, des sujets ont été répartis aléatoirement pour apprendre une séquence de piano à une main, utilisant les cinq doigts, soit par pratique réelle, soit par imagerie mentale, pendant 5 heures par jour sur 5 jours (avec un groupe témoin sans entraînement). Les deux groupes d'entraînement, physique et mental, ont amélioré leur précision et réduit le nombre d'erreurs. En parallèle, le seuil d'activation des muscles par stimulation transcrânienne a diminué de manière similaire dans les deux groupes d'entraînement, et la taille de la représentation corticale des groupes musculaires fléchisseurs et extenseurs des

doigts a augmenté, contrairement au groupe témoin sans entraînement.

Jackson et al en 2003 ont utilisé la Tomographie par émission de positons (TEP) pour examiner les changements fonctionnels cérébraux induits par l'apprentissage d'une séquence de mouvements du pied via l'imagerie motrice (IM). Après un entraînement intensif en IM, une augmentation de l'activité du cortex orbitofrontal médial, une région clé pour l'acquisition de tâches séquentielles (Lafleur et al., 2002), a été observée, tandis que l'activité du cervelet diminuait. Ces résultats, similaires à ceux obtenus par la pratique physique, suggèrent que l'IM peut produire des modifications cérébrales comparables, renforçant l'idée que l'IM améliore les performances en agissant sur la préparation et l'anticipation des mouvements.

Lacourse et al. (2004) ont ajouté que l'entraînement par IM peut également engendrer une diminution de l'activation dans certaines régions cérébrales, suggérant une optimisation de l'efficacité neuronale à travers la pratique mentale avec l'optimisation de celle-ci par l'entraînement.

L'utilisation de l'IRM fonctionnelle (IRMf) a nettement émergé ces dernières années. Zhang et al. (2012) ont quant à eux démontré par le biais de cet examen complémentaire l'équivalence des modifications en terme de connectivité fonctionnelle qu'il existait entre PP et IM, par diminution ou augmentation de la connectivité entre différentes aires cérébrales.

La connectivité fonctionnelle désigne la manière dont différentes régions du cerveau interagissent et communiquent entre elles pendant l'exécution de tâches spécifiques.

Parallèlement aux changements en terme de connectivité, des études ont rapportés une augmentation de la densité de matière grise (+5.4 % dans l'étude de Zich et al., 2015) après une phase d'entraînement par IM, soulignant que l'IM pourrait bel et bien influencer des processus tels que la synaptogénèse et création de nouveaux circuits neuronaux.

Maclver et ses collègues ont exploré le changement de la représentation corticale de la zone du visage vers celle de la main et du bras chez des amputés du membre supérieur qui ont suivi un programme d'entraînement en imagerie motrice (IM) pendant six semaines, ciblant les mouvements de la main amputée. Ils ont découvert que la pratique de l'IM pouvait potentiellement inverser les effets de la plasticité mal-adaptative. Avant l'intervention par IM, l'exécution d'un mouvement de pincement des lèvres activait simultanément la zone corticale associée à la main. Cependant, après l'entraînement par IM, seule la région liée au contrôle moteur de la bouche était activée, ce qui s'est accompagné d'une diminution de la douleur ressentie.

Ces résultats démontrent l'influence de l'entraînement en IM sur la plasticité corticale liée à l'activité chez les amputés du membre supérieur.

Ils mettent également en évidence l'efficacité dans la réduction de la douleur du membre fantôme. De plus, les auteurs suggèrent que cette méthode pourrait être adaptée pour la gestion de la douleur après des amputations du membre inférieur.

Comme la pratique physique, l'entraînement mental agit sur la plasticité cérébrale en permettant une réorganisation substantielle à deux niveaux : plasticité synaptique dans les voies préexistantes encore fonctionnelles et plasticité anatomique entraînant probablement la formation de nouveaux circuits. Après avoir mis cela en évidence, le

potentiel de l'IM dans les protocoles de rééducation et de réadaptation ne devrait plus être une hypothèse. Maintenant, il s'agirait plutôt de s'interroger sur la manière d'intégrer cette technique en clinique pour qu'elle soit la plus efficace possible. [61]

6 Méthodes d'évaluations des capacités d'imagerie motrice

L'imagerie motrice est un moyen de simulation de l'action et certains auteurs ont validé un continuum fonctionnel entre ce mécanisme et la théorie des modèles internes du contrôle moteur défini précédemment. L'étude de l'IM a été rendue possible grâce à deux approches qui exploitent les similitudes entre les actions réelles et imaginées : le jugement d'action et la chronométrie mentale. À partir de ces approches et des exigences spécifiques des tâches, des outils ont été développés afin de s'assurer des bonnes capacités d'imagerie des individus.

En effet, il est primordial de s'assurer qu'une personne soit capable de réaliser l'IM avant de ne lui proposer un programme d'entraînement.

Avant de parler de la capacité d'imagerie des patients amputés, il semble essentiel de connaître le terme d'aphantasie, désignant une condition neurologique où une personne est incapable de visualiser des images mentales. Les individus atteints d'aphantasie ne peuvent pas former d'images visuelles dans leur esprit, même lorsqu'ils essaient de se souvenir de quelque chose ou d'imaginer une scène.

Il semblerait que 2 à 5% de la population mondiale en soit atteint (CNRS).

6.1 Faisabilité de l'IM chez le patient amputé.

La non utilisation prolongée d'un membre ou segment de membre peut impacter négativement la capacité d'IM d'un sujet. Malouin et al. [62] ont en effet montré en 2009 que des patients amputés ou ayant subi une immobilisation prolongée avaient une chronométrie mentale et une qualité d'image préservées mais néanmoins plus faibles pour le côté affecté en comparaison au côté sain.

Cependant, ils ont également montré que ces paramètres étaient positivement corrélés au port de la prothèse, objectivant une amélioration significative grâce à l'entraînement et l'utilisation de cette dernière : les capacités d'IM sont donc entraînables et améliorables dans notre population.

6.2 Principales méthodes d'évaluation de l'IM

6.2.1 Tests de latéralité

Ce test consiste à présenter des photographies de segments corporels (un pied, une main), dont le patient doit déterminer la latéralité (droite ou gauche). Les images sont présentées selon divers angles de rotations (0° , 30° , 80° etc) en sens horaire et anti-horaire. L'examineur évalue l'exactitude de la réponse ainsi que le temps que le sujet met à répondre. Le temps de réponse est censé suivre la loi de Fitts, augmentant lorsque le membre présenté est dans une position biomécaniquement plus contraignante. Ce test reflète les capacités d'imagerie motrice du sujet car celui-ci doit effectuer une simulation motrice interne de ses propres segments de membre, en les imaginant tourner pour adopter la position représentée [63].

Il n'a cependant pas été utilisé dans les études retrouvées dans la littérature, de même qu'il n'est pas trouvé de cut-off de validité pour ce test, en terme de pourcentage de bonne réponse ou de temps limite.

6.2.2 Tests de qualité d'imagerie

6.2.2.1 MIQ-RS : Movement Imagery Questionnaire – Revised Second Version

Les MIQ et MIQ-R étaient des questionnaires d'imagerie motrice permettant de quantifier la capacité d'un individu à réaliser une tâche d'entraînement mental destinés à des populations en bonne santé, nécessitant un haut degré d'habileté et de coordination. Dans ce contexte, le MIQ-RS a été conçu par Gregg et al. en 2005 [64] afin d'être réalisable par les personnes à mobilité réduite.

Les tâches motrices à imaginer sont dans un ordre précis de un à 14 (sept actions, deux modalités d'imagination, soit visuelle ou kinesthésique). Les sous-échelles visuelles et kinesthésique sont cotées sur 49 points maximaux.

Il se déroule en 5 étapes :

- Adoption d'une position de départ spécifique
- L'examineur lit au sujet la description du geste qu'il va devoir effectuer
- Le sujet réalise réellement 1 fois le mouvement
- Il est ensuite demandé soit d'imaginer ce même mouvement visuellement (en perspective externe), soit de le ressentir (en perspective interne)
- Puis le sujet réalise une cotation sur une échelle de Likert allant de 1 à 7 (1 étant très difficile et 7 étant très facile) permettant d'objectiver la clarté visuelle de l'image à la 3ème personne ou les sensations kinesthésiques à la 1ère personne.

Ce questionnaire a été adapté et validé en français par Loison et al en 2013 [65]. Ces derniers rapportent qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de cut-off afin de parler de bon ou mauvais imageur.

Le temps de passation est d'environ 20 minutes.

6.2.2.2 KVIQ : Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire

Le questionnaire d'imagerie kinesthésique et visuelle (KVIQ) est un outil d'évaluation conçu spécifiquement pour les personnes handicapées physiques.

KVIQ-20

Le KVIQ-20, développé par Malouin et al. en 2007 [66], est conçu pour évaluer l'imagerie motrice chez des personnes qui nécessitent un guidage et qui ne peuvent pas se tenir debout ou réaliser des mouvements complexes. Les actions motrices évaluées sont simples, comme des mouvements de la tête, des épaules ou du tronc, et le test se fait en position assise. Administré par un examinateur, le KVIQ-20 permet de vérifier la qualité de l'imagerie en interrogeant le sujet sur ce qu'il voit et ressent, garantissant ainsi une évaluation précise de l'imagerie interne.

Le questionnaire comporte 20 items et se déroule en 4 étapes (indication donnée quant au geste à réaliser, réalisation réelle du geste, réalisation du geste en imagerie mentale, cotation de la clarté visuelle et kinesthésique), qui mesurent les capacités d'imagerie visuelle et kinesthésique, non pas en termes de difficulté, mais de vivacité. Après chaque phase d'imagerie, le patient évalue la « clarté visuelle de l'image » ou « l'intensité de la sensation » sur une échelle de 1 (« Image aussi claire qu'un

film/Sensation aussi intense qu'en faisant l'action ») à 5 (« Pas d'image/Pas de sensation »).

L'administration du KVIQ-20 peut durer jusqu'à 45 minutes chez des patients ayant des difficultés de concentration, d'où la création d'une version courte, le KVIQ-10, pour une utilisation clinique plus adaptée.

KVIQ-10

Cette version abrégée comporte 10 items, répartis en cinq portant sur l'imagerie visuelle et cinq sur l'imagerie kinesthésique. Les mouvements sélectionnés pour cette version sont : un mouvement du tronc, un mouvement des bras, un mouvement digital, un mouvement de la jambe, et un mouvement du pied.

6.2.3 VGPT et C-VRFT

VGPT [67]

Cet outil consiste à demander au sujet de réaliser une série de mouvements aller-retour avec un stylo, en traçant de part et d'autre d'une ligne sur une feuille jusqu'à atteindre une cible située de l'autre côté. Le sujet doit effectuer cinq allers-retours consécutifs. Plusieurs planches de différentes tailles sont présentées successivement. Le sujet est chronométré afin d'enregistrer la durée totale de mouvement. Une fois que le sujet a réalisé ces cinq aller-retours en mouvement réel, il lui est demandé de les réaliser à nouveau mais en IM.

Ce test illustre donc bien le compromis nécessaire entre vitesse et précision dicté par la loi de Fitts. On s'attend ici à ce que la loi de Fitts soit donc respectée en mouvement réel comme en mouvement imaginé avec des temps de réalisation proches.

C-VRFT [67]

Cet outil est assez similaire au précédent, consistant à demander au sujet de déplacer un curseur virtuel sur un écran pour atteindre des cibles disposées de manière radiale autour d'un point central. Le sujet doit accomplir plusieurs allers-retours entre le point central et les cibles qui varient en taille et en distance. Le sujet est chronométré pour enregistrer la durée totale des mouvements. Après avoir effectué cette tâche en mouvement réel, il lui est demandé de la réaliser à nouveau, mais cette fois-ci en IM. On s'attend également à ce que la loi de Fitts soit respectée à la fois pour les mouvements réels et les mouvements imaginés, avec des temps de réalisation similaires dans les deux conditions.

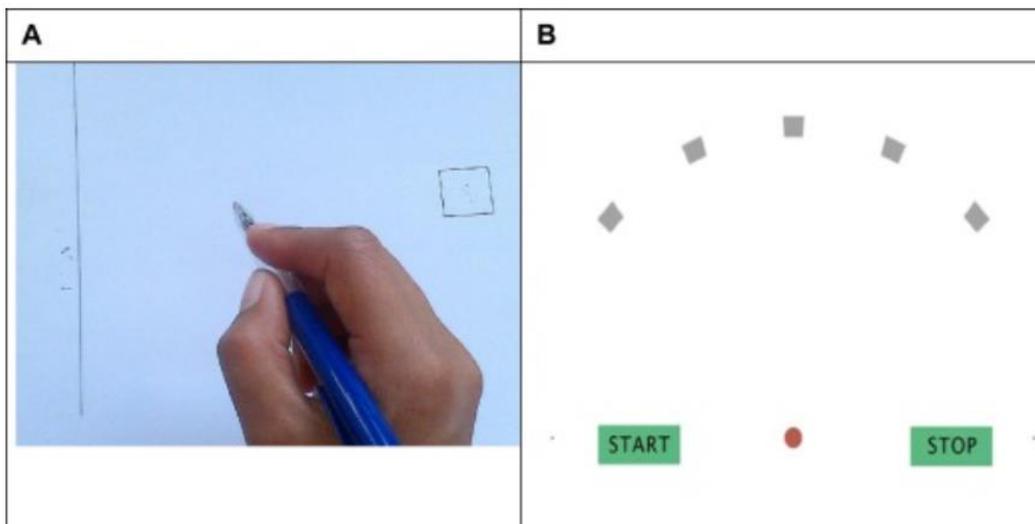


Figure 4. Représentation en A : le VGPT ; en B : le C-VRFT. (D'après Ferguson et al. [67])

6.2.4 Tests de chronométrie mentale

Le Timed Dependent Motor Imagery test (TDMI) est un test clinique rapide dans lequel l'examineur enregistre le nombre de mouvements imaginés (par exemple, un mouvement de pas) sur 3 périodes de temps (15, 25 et 45 secondes).

On peut dans ce contexte demander au patient de s'imaginer marcher durant 15 puis 45 puis 25 secondes, et lui demander le nombre de pas effectués lors de chaque période de temps. Il est supposé que les personnes signalant une augmentation du nombre de pas concordante avec l'augmentation de la durée sont bel et bien capables de se les imaginer [54].

Pour compléter cette évaluation, un test de congruence temporelle peut être utilisé. Dans ce test, le sujet doit d'abord imaginer, puis réaliser une série de mouvements de marche. L'examineur compare alors le temps imaginé avec le temps réel d'exécution (IM/ME). On parle d'isochronie lorsque ce ratio est de 1, indiquant une parfaite congruence entre le temps imaginé et le temps exécuté [52].

Bien que ces tests mesurent la quantité de mouvements imaginés, ils ne permettent pas d'évaluer la qualité des images motrices produites, raison pour laquelle ils sont couplés aux questionnaires comme le KVIQ ou MIQ-RS.

7 Règles de bonne pratique en imagerie motrice

La pratique de l'IM se doit de suivre certaines règles de bonne pratique afin d'atteindre une efficacité maximale, ces règles sont pour la plupart empiriques, basées sur de nombreuses études portant évidemment sur le domaine médical, mais également dans le domaine éducatif, de la musique, de la psychologie et du sport.

Une méta-analyse réalisée par Schlster et al en 2011 [32] retranscrit les règles de

bonne pratique principalement retrouvées à la lecture de nombreux protocoles réalisées antérieurement sur un total de 133 études, permettant de mettre en évidence l'impact de caractéristiques propres à l'imagerie motrice entraînant de meilleurs résultats après entraînement. Ces indications sont par ailleurs couplées aux règles du protocole PETTLEP qui est défini ci-après.

- La position de l'individu pendant la pratique de l'IM doit être spécifique à la tâche.
- L'environnement alentours doit être spécifique à la tâche.
- La concentration de l'individu doit être orientée vers l'activité motrice.
- Les sessions IM doivent plutôt être pratiquées pendant ou après la PP. Dans tous les cas, l'IM doit venir en complément de la PP.
- Les instructions au patient doivent être orales, en direct, données par un instructeur.
- Les descriptions des tâches à effectuer doivent être bien détaillées. Les instructions se veulent plutôt standardisées à tous les patients et non systématiquement adaptées aux problèmes du participant avec la tâche.
- La plupart des études ne réalisaient pas de séance de familiarisation avec l'IM avant le début de l'intervention.
- Les séances doivent être individuelles et le travail en IM réalisé les yeux fermés.
- La perspective interne est privilégiée, avec la modalité kinesthésique.

Plus récemment, Puyjarinet publie en 2019 un article dans lequel il ajoute des caractéristiques importantes surajoutées aux précédentes :

- Être aussi disponible que possible sur le plan attentionnel (phase préalable de

relaxation ou de méditation de pleine conscience souhaitable)

- Combiner la pratique de l'IM avec des phases d'observation de l'action à réaliser (observation d'un tiers en situation réelle ou sur vidéo par exemple)
- Respecter autant que possible les caractéristiques spatio-temporelles du mouvement travaillé
- Préciser au maximum le contexte dans lequel le mouvement est travaillé (exemple : pour améliorer l'écriture, travailler en IM avec le même matériel qu'en condition réelle)
- Ne pas dépasser 20 minutes de pratique par session (imagerie motrice pure, soit mise à part de la préparation par relaxation et du recentrage en fin de séance).

De plus, Malouin [68] explique l'importance d'effectuer un contrôle périodique par le thérapeute du ressenti et de la qualité d'image du patient, notamment pour vérifier que les instructions soient bien comprises et bien travaillées, et cela en particulier chez les personnes âgées ou rapidement fatigables pouvant avoir des difficultés à se concentrer sur de longues périodes.

Un modèle d'entraînement à l'IM dénommé PETTLEP a été créé par Holmes et Collins en 2001 [69], particulièrement dans le domaine du sport. Ce modèle vise à améliorer les performances des athlètes en leur permettant de simuler mentalement des situations spécifiques à leur sport. Le protocole se compose de sept éléments clés qui sont représentés par l'acronyme PETTLEP :

P = Physical (Physique)

Cette composante implique de recréer les sensations physiques associées à la performance réelle. Cela peut inclure le port de l'équipement spécifique, la posture du corps, et même la respiration.

Exemple dans le domaine sportif : Un sprinteur pourrait s'imaginer en train de porter ses chaussures de course, ressentir la tension dans ses muscles, et visualiser son départ explosif du bloc de départ.

Exemple pour l'amputé de membre inférieur : L'amputé porte sa prothèse pendant l'imagerie mentale pour recréer les sensations physiques associées à la marche avec cette prothèse. Il ressent la pression de la prothèse sur son moignon, la tension dans les muscles de sa jambe intacte, et le balancement de son corps lors de chaque pas.

E = Environment (Environnement)

L'imagerie mentale doit se faire dans un environnement aussi similaire que possible à celui de la compétition réelle. Cela inclut les sons, les odeurs, la température, et tout autre facteur environnemental pertinent.

Exemple dans le domaine sportif : Un joueur de tennis peut imaginer le bruit des spectateurs, la sensation du vent sur le terrain, et la texture de la surface de jeu sous ses pieds.

Exemple pour l'amputé de membre inférieur : Pendant l'imagerie mentale, l'amputé se visualise en train de marcher dans divers environnements de rééducation, comme une salle de rééducation, un couloir de l'hôpital, ou même sur un trottoir à l'extérieur. Il imagine les obstacles qu'il pourrait rencontrer, comme des petites bordures ou des sols inégaux.

T = Task (Tâche)

La tâche doit être représentée de manière spécifique, en mettant l'accent sur les aspects techniques et stratégiques de la performance.

Exemple dans le domaine sportif : *Un golfeur peut visualiser la technique spécifique d'un swing, en se concentrant sur la position de ses mains, l'angle de son club, et le contact avec la balle.*

Exemple pour l'amputé de membre inférieur : *L'amputé se concentre spécifiquement sur la technique de la marche avec une prothèse. Il visualise le placement correct de son pied prothétique, le contrôle du mouvement de son genou, et l'équilibre à chaque pas. Il peut aussi imaginer des exercices spécifiques recommandés par son kinésithérapeute, ou des activités supérieures de la marche comme monter et descendre des escaliers.*

T = Timing (Temps)

L'imagerie mentale doit être synchronisée avec la durée réelle de la tâche. Il est important de respecter le rythme de l'action pour que l'imagerie soit réaliste.

Exemple dans le domaine sportif : *Un nageur peut imaginer une course de 100 mètres en visualisant chaque coup de bras et chaque respiration à la même vitesse que lors de la compétition réelle.*

Exemple pour l'amputé de membre inférieur : *L'amputé synchronise son imagerie mentale avec le rythme réel de la marche. Il imagine chaque pas en temps réel, en veillant à ce que le mouvement soit fluide et naturel, comme il le ferait lors d'une séance de rééducation réelle. Cela aide à intégrer le tempo correct pour éviter une marche trop lente ou une boiterie.*

L = Learning (Apprentissage)

L'imagerie doit être adaptée au niveau d'apprentissage et d'expérience de l'athlète.

Cela signifie que l'imagerie doit évoluer avec l'athlète à mesure qu'il s'améliore.

Exemple dans le domaine sportif : *Un débutant en basketball peut se concentrer sur des aspects de base comme le dribble, tandis qu'un joueur avancé peut visualiser des mouvements complexes comme des feintes ou des dunks.*

Exemple pour l'amputé de membre inférieur : *Au début de sa rééducation, l'amputé visualise des étapes simples, comme maintenir l'équilibre en position debout ou faire un seul pas en avant. À mesure qu'il progresse, son imagerie mentale devient plus complexe, intégrant des tâches telles que marcher sur des surfaces inclinées ou tourner brusquement.*

E = Emotion (Emotion)

Les émotions doivent être intégrées à l'imagerie pour la rendre plus réaliste. Cela inclut la gestion du stress, de l'excitation, ou de la pression qui accompagne la compétition.

Exemple dans le domaine sportif : *Un archer peut s'imaginer ressentir l'anxiété qui précède un tir important, puis se visualiser en train de gérer cette émotion pour rester concentré.*

Exemple pour l'amputé de membre inférieur : *L'amputé intègre dans son imagerie mentale les émotions qu'il pourrait ressentir en marchant avec sa prothèse, comme la frustration de trébucher ou l'anxiété de marcher en public. Il s'entraîne mentalement à gérer ces émotions pour maintenir sa concentration et sa motivation.*

P = Perspective (Perspective)

L'athlète doit choisir entre une perspective interne (vivre l'expérience à travers ses

propres yeux) ou externe (se voir comme un observateur extérieur).

Exemple dans le domaine sportif : Un skieur pourrait s'imaginer dévalant une pente en voyant la piste devant lui (perspective interne), ou il pourrait se visualiser de l'extérieur pour évaluer sa posture et sa technique (perspective externe).

Exemple pour l'amputé de membre inférieur : L'amputé utilise deux perspectives dans son imagerie mentale. Il alterne entre une perspective interne, où il voit le monde à travers ses propres yeux en marchant en percevant de façon concomitante les sensations que cela procure au niveau articulaire et musculaire, et une perspective externe, où il se visualise de l'extérieur pour observer et corriger sa posture et sa démarche.

8 Impact de l'imagerie motrice lors de la rééducation à la marche dans la littérature.

8.1 Chez le sujet hémiparétique post AVC

Le travail de la marche par imagerie motrice dans le cadre de la rééducation a été principalement exploré chez les patients victimes d'un AVC avec hémiparésie séquellaire. De nombreuses études ont montré une amélioration de la marche sur terrain plat et en ligne droite, ainsi que des progrès sur plusieurs paramètres tels que la longueur de pas et la symétrie de la foulée.

Par exemple, Dunsky et al. [70] ont mené une étude pilote en 2006 sur quatre personnes atteintes d'hémiparésie post-AVC, en leur proposant un protocole

d'imagerie motrice (IM) à raison de trois séances par semaine pendant six semaines. Les résultats ont révélé des augmentations significatives de la vitesse de marche, de la longueur de foulée, de la cadence, ainsi que du temps d'appui simple sur le membre inférieur affecté, tout en réduisant le temps d'appui double. Toutefois, il est important de noter que l'activité physique des participants n'a pas été quantifiée, ce qui soulève la question de savoir si ces améliorations étaient entièrement dues à l'IM.

Deux ans plus tard, Dunsky et al. [71] ont mené une nouvelle étude sur 17 patients hémiparétiques post-AVC, à au moins trois mois de l'accident vasculaire. Avec les mêmes modalités de prise en charge, ils ont observé une amélioration significative de 40 % de la vitesse de marche après intervention, en plus des résultats qualitatifs similaires à la première étude (longueur de pas, cadence, temps d'appui simple et double).

Hwang et al. [72] ont ensuite réalisé une étude contrôlée randomisée dans la même population, comparant un protocole combinant IM et rééducation physique (PP) pendant quatre semaines à une rééducation physique seule. Cette étude a montré une amélioration significative de la vitesse de marche et de la longueur de pas dans le groupe IM.

En 2013, Cho et al. [73] ont mené une autre étude contrôlée randomisée chez des patients AVC chroniques. Leur protocole combinant IM et PP a montré des améliorations significatives, supérieures à celles obtenues par la PP seule, notamment sur des critères comme le test de marche de 10m et le Timed Up and Go (TUG).

Dans la même lignée, Verma et al. [74] ont démontré une amélioration significative de la vitesse de marche et de la distance parcourue lors du test de marche de 6 minutes.

En 2017, Guerra et al. [75] ont réalisé une méta-analyse incluant 32 essais contrôlés randomisés sur l'IM chez les patients post-AVC. Bien que la qualité méthodologique des études et les protocoles d'IM variaient considérablement, l'analyse des sous-groupes a révélé que l'IM était associée à une amélioration du Timed Up and Go et de la vitesse de marche.

La même année, Li et al. [76] ont publié une autre méta-analyse qui aboutissait à des conclusions similaires. Ils ont souligné l'hétérogénéité des études et les limites méthodologiques, mais ont également noté les bénéfices potentiels de l'IM.

Enfin, plus récemment, en 2023, une nouvelle méta-analyse [77] portant sur l'effet de l'IM sur la rééducation locomotrice des patients hémiparétiques post-AVC a mis en lumière des améliorations significatives de l'équilibre et de la marche notamment sur son versant qualitatif concernant la vitesse ou la longueur de pas.

Ces travaux centrés sur les patients post-AVC, ont ouvert la voie à l'exploration de l'IM dans d'autres populations non neurologiques, notamment chez les amputés afin d'améliorer la marche.

8.2 Chez le sujet amputé.

Il n'existe à l'heure actuelle que peu d'études explorant le sujet, en l'occurrence il n'a

été retrouvé que 4 études portant sur un travail en imagerie motrice afin d'améliorer la marche de l'amputé de membre inférieur.

La première étude retrouvée date de 2017, Cunha et al [78] ont réalisé une étude contrôlée randomisée chez des amputés trans-tibiaux comparant 10 patients bénéficiant d'IM + PP vs 5 patients bénéficiant de PP seule. Les séances d'IM étaient d'une durée de 40 minutes, dispensées 3 fois par semaine durant 4 semaines, avec des exercices incluant la marche et ses activités supérieures (escaliers, pentes, sauter, courir ...). Ils ont mis en évidence par l'intermédiaire de l'AQM des améliorations significatives des performances biomécaniques de la marche après l'intervention, avec une meilleure absorption des chocs, une capacité de propulsion améliorée, et un meilleur contrôle de l'équilibre du membre prothétique. Cependant ces résultats, même s'ils laissent présager d'une amélioration fonctionnelle, ne permettent pas de conclure sur les capacités de marche.

Ensuite, dans le cadre d'un mémoire de kinésithérapie, Vanmairis [79] a mené une étude visant à évaluer les capacités d'imagerie motrice (IM) chez des patients amputés comme mentionné précédemment. L'inclusion concernait uniquement des sujets amputés au niveau TT avec une étiologie vasculaire. Après avoir confirmé la faisabilité de cette pratique dans cette population, la seconde partie de son travail portait sur une comparaison de la qualité de marche entre les deux groupes : un groupe expérimental recevant à la fois de l'IM et un programme de rééducation physique (PP), et un groupe témoin ne recevant que la PP. Chaque groupe, composé de quatre participants, a suivi cinq séances par semaine pendant deux semaines.

Les résultats principaux ont montré des améliorations dans le groupe expérimental,

bien que celles-ci ne soient pas statistiquement significatives, en grande partie à cause d'un effectif trop restreint. Parmi les bénéfices observés, on note une augmentation de la vitesse de marche (+0,22 m/s dans le groupe expérimental contre +0,21 m/s dans le groupe témoin), une meilleure symétrie de pas (+14,86 % contre +6,43 %), une amélioration du temps d'appui sur le membre amputé (+7,93 % contre +7,27 %), ainsi qu'une progression dans le test Timed Up and Go (TUG), avec un gain de 15,8 secondes contre 8,5 secondes dans le groupe témoin.

Matalon et al. [80] ont quant à eux mené une étude de cas en 2021 sur un patient amputé transfémoral, en intégrant un protocole d'imagerie motrice (IM) à sa rééducation sur une période de 4 semaines pour un total de 12 séances. Les résultats montrent une amélioration non significative du test TUG (réduction de 3 secondes à la fin de la prise en charge). En revanche, des améliorations significatives ont été observées au Tinetti Performance Oriented Mobility Assessment (POMA), avec un gain de 10 points, ainsi qu'au niveau de l'équilibre, mesuré par l'échelle d'équilibre de Berg. Ils ont par ailleurs montré une diminution significative des douleurs du membre fantôme et une meilleure intégration de la prothèse au niveau du schéma corporel. Cette étude reste cependant de faible niveau de preuve.

Il est important de noter que ces 3 études ont inclus des patients à distance de l'amputation le plus souvent, avec parfois plusieurs années écoulées depuis la chirurgie, interrogeant sur les effets de l'IM au stade aigu post opératoire.

Cela nous mène à une 4ème étude très récente puisque publiée en 2024 par Saruco et al. [81] initiant un travail d'IM rapidement après l'entrée en centre dès la phase pré-

prothétique. Cette étude compare un groupe expérimental (N=9) recevant de l'IM combinée à la PP avec un groupe témoin (N=10) effectuant une tâche cognitive neutre associée à la même rééducation. L'inclusion prenait en compte toutes les étiologies d'amputation ainsi que les niveaux trans-tibiaux et trans-fémoraux. L'IM était pratiqué 10 minutes par jour, 5 jours par semaine, et portait sur les exercices précédemment réalisés durant la séance de kinésithérapie lors des temps de pause.

En phase pré prothétique il est notifié des travaux comme la représentation mentale de la marche unipodale entre les barres parallèles dans les suites de sa réelle réalisation, associée à des imageries de flexion/extension de hanche côté amputé cherchant à simuler le mouvement comme si les patients marchaient déjà avec leur prothèse. En phase prothétique on retrouvait des imageries de pratiques de marche et de TUG test, toujours durant les temps de pause lors des séances de kinésithérapie.

Leur critère de jugement principal comprenait le test de marche de 10m ainsi que le TUG.

A l'issue de la phase pré-prothétique et donc après mise en place de la prothèse, le groupe IM avait des temps significativement plus bas pour le test de 10 mètres avec 21.06 secondes vs 31.83 secondes pour le groupe témoin ($p = 0.02$). Le TUG quant à lui a montré une différence en faveur du groupe IM mais non significative avec 30.92 secondes vs 34.29 secondes.

Le groupe IM a montré une amélioration plus rapide entre T3 (à 3 semaines de la mise en place de prothèse) et T4 (avant la sortie du centre de rééducation), bien que les performances globales entre les deux groupes aient fini par converger lors des derniers tests à 6 semaines de la sortie.

Les temps réalisés dans le groupe IM sont systématiquement meilleurs lors des tests après le T2, mais sans significativité.

La force globale selon la cotation MRC était évaluée, bien que les deux groupes aient amélioré leur force, le groupe IM a montré une plus grande augmentation de force entre T2 et T4 (3,67 à 4,67) par rapport au groupe témoin (3,88 à 4,33), et cela de façon significative ($p = 0.04$).

Enfin, il n'y a pas eu d'amélioration significative des douleurs pour le groupe IM par rapport au groupe contrôle.

Ces résultats sont prometteurs mais insuffisants, illustrant la carence actuelle de la littérature concernant l'utilisation de l'IM pour la rééducation à la marche de nos patients amputés, malgré des preuves de plus en plus solides de cette pratique chez les patients neurologiques dans le cadre d'hémiplégie post AVC. De plus, les tests quantitatifs de la marche effectués concernaient soit le test de marche de 10m, soit le TUG. Des tests de plus longue durée n'ont jamais été réalisés, comme le test de marche de 2 minutes ou de 6 minutes qui permettraient d'avoir une meilleure visibilité de l'impact de l'IM sur les capacités de locomotion. Enfin, les paramètres qualitatifs de marche semblent montrer une tendance favorable et intéressante, mais le manque de puissance des études retrouvées ne permettent pas de conclure.

En somme, en ajoutant à ces résultats la capacité de l'IM à impacter la plasticité cérébrale et renforcer les schémas moteurs lors de la phase de simulation interne du mouvement nommée « phase d'anticipation » pouvant permettre un meilleur contrôle du membre résiduel et une meilleure capacité de marche, il semble intéressant de poursuivre les explorations sur le sujet.

Ceci a motivé la création de ce protocole d'étude.

OBJECTIFS

1 Objectif principal de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact de l'imagerie motrice sur l'amélioration des capacités de marche par l'intermédiaire du test de marche de 2 minutes chez les patients amputés trans-tibiaux d'étiologie vasculaire.

Nous émettons l'hypothèse que l'intégration de l'IM dans la rééducation améliore davantage la marche des patients par rapport à un protocole sans IM. En influençant la plasticité cérébrale, l'IM peut consolider la phase d'anticipation du mouvement, renforcer les circuits neuronaux du contrôle moteur, et améliorer la coordination neuromusculaire. Ainsi, elle pourrait non seulement accroître les capacités de marche, mais aussi optimiser la réhabilitation fonctionnelle en particulier chez des patients physiquement fatigables grâce à l'augmentation des répétitions d'exercices pratiqués mentalement.

Pour cela, nous élaborons un protocole d'imagerie motrice standardisé.

2 Objectifs secondaires de l'étude

Pour approfondir notre compréhension des effets de l'imagerie motrice dans la rééducation des patients amputés, nous avons défini plusieurs objectifs secondaires,

qui visent à explorer divers aspects de la réhabilitation. Ces objectifs incluent :

Objectif n° 1 : Évaluer l'effet de l'imagerie motrice (IM) sur la qualité de marche, à l'aide d'outils d'analyse fonctionnelle de la marche (AFM) appelé le Zeno

Objectif n° 2 : Analyser l'influence de l'IM sur l'équilibre et les transferts fonctionnels (notamment le passage de la position assis-debout), en lien avec l'autonomie des patients.

Objectif n° 3 : Étudier l'impact indirect de l'IM sur l'adaptation psychomotrice et l'utilisation de la prothèse (perception corporelle, confiance, adaptation à la prothèse).

Objectif n°4 : Examiner les effets de l'IM sur les capacités fonctionnelles après le retour à domicile, pour évaluer la durabilité des bénéfices à moyen terme.

Matériel et méthode

1 Design expérimental et localisation

Il s'agit d'une étude interventionnelle à risques et contraintes minimales (RIPH 2), unicentrique, prospective, contrôlée, randomisée, en simple aveugle.

Nous comparerons les résultats d'un protocole de rééducation classique associé à l'imagerie motrice (groupe expérimental) avec ceux d'un protocole incluant des séances de relaxation (groupe contrôle).

Elle se déroulera dans le centre de réadaptation « Les Hautois » situé dans la ville de Oignies.

2 Stratégie de recrutement et population

Pour cette étude, nous envisageons d'inclure tous les patients qui se présentent au centre de réhabilitation « Les Hautois » pour une prise en charge rééducative après une amputation trans-tibiale, lorsque cette amputation est due à une cause « vasculaire » (artérite chronique et/ou diabète). Nous avons choisi de regrouper ces deux causes d'amputation car elles entraînent généralement un profil similaire en termes de comorbidités et de besoins rééducatifs.

3 Critères d'éligibilité

3.1 Critères d'inclusion

Les critères d'inclusions sont (tous les critères sont nécessaires) :

- Patient âgé de 18 à 80 ans ;
- Patient ayant subi une amputation unilatérale trans-tibiale ;
- L'étiologie en cause de l'amputation est d'origine vasculaire (AOMI, diabète ...)

3.2 Critères de non inclusion

Les critères de non-inclusions sont (la présence d'un seul critère suffit à l'exclusion) :

- Patient ayant déjà bénéficié d'une rééducation à la marche au préalable ;
- Patient amputé bilatéral ou de membre supérieur ;
- Patient ayant une pathologie entraînant une atteinte neuromotrice des membres inférieurs (AVC, SEP, maladie de Parkinson, etc.) ;
- Patient ayant un score inférieur à 24/30 au MMSE ;
- Patient considéré comme non apte à la pratique de l'IM à la suite des tests de faisabilité, soit MIQ-RS < 21/49 par catégorie et/ou échec au test de chronométrie mentale ;
- Patient ne sachant pas lire ou écrire le français ;
- Patient sous mesure de protection judiciaire ;
- Patient présentant une contre-indication à la réalisation du TM2 :
 - o Infarctus du myocarde datant de moins d'un mois, angor instable,

hypertension artérielle systémique non contrôlée, maladie valvulaire aortique sévère symptomatique, thrombophlébite évolutive et/ou embolie pulmonaire récente, péricardite aiguë,

- Asthme instable, insuffisance respiratoire chronique décompensée,
- Instabilité hémodynamique
- Douleur de membre inférieur limitant la marche

3.3 Critères de sortie d'étude précoce

- Tout sujet sera libre d'arrêter l'étude ou de retirer son consentement au moment où il le souhaite, avant, pendant ou après la réalisation du recueil.
- Évènement indésirable survenant pendant l'étude.
- Apparition d'une contre-indication à la réalisation du TM2 (test de marche de 2 min) estimé par le corps médical :
 - Infarctus du myocarde datant de moins d'un mois, angor instable, hypertension artérielle systémique non contrôlée, maladie valvulaire aortique sévère symptomatique, thrombophlébite évolutive et/ou embolie pulmonaire récente, péricardite aiguë,
 - Asthme instable, insuffisance respiratoire chronique décompensée,
 - Instabilité hémodynamique
 - Douleur de membre inférieur limitant la marche

4 Randomisation et Aveugle

Si l'inclusion des participants est confirmée, la randomisation sera réalisée par blocs avec un ratio de 1:1, immédiatement avant le début de la première phase de test. Les participants seront répartis en deux groupes de taille égale : l'un suivra un protocole de rééducation classique accompagné de séances de relaxation, tandis que l'autre groupe suivra le même protocole, enrichi par des exercices d'imagerie motrice.

Le simple aveugle sera respecté via la réalisation des différents tests par un kinésithérapeute ne prenant pas en charge les patients participant à cette étude et qui n'aura pas d'informations sur leur groupe respectif.

5 Critères de jugement

5.1 Critère de jugement principal

Le critère de jugement principal choisit pour cette étude est le **test de marche de 2 minutes (TM2)**. Il s'agit d'une alternative très intéressante au test de marche de 6 minutes (TM6) chez le patient amputé, d'autant plus si l'étiologie est vasculaire. En effet, étant donné la fatigabilité potentielle dans cette population et par conséquent un périmètre de marche limité, la diminution de la durée de l'épreuve permet théoriquement à un plus grand nombre de patient de la réaliser entièrement.

Reid et al. [82] ont évalué la relation entre la distance du TM2 et la distance du TM6,

trouvant l'équation prédictive suivante :

$$- \quad \mathbf{TM6 = 3.14 \times (TM2) - 54.5 \text{ mètres}}$$

Cette équation prédictive est décrite comme excellente, avec un R^2 (coefficient de détermination) de 0.91, ce qui signifie que 91% de la variance de la distance du TM6 est expliquée par le TM2.

Ils ont également mis en évidence une excellente reproductibilité, tant intra qu'inter-évaluateurs, chez les patients amputés, ainsi qu'un coefficient de corrélation (r) TM2-TM6 de 0.95 ($p < 0.0001$).

Grémeaux et al. [83] ont démontré que le test de marche de 2 minutes, réalisé en fin de rééducation après la délivrance de la prothèse définitive, permet de différencier les patients amputés présentant des limitations à la marche (évaluées par l'échelle de Houghton) de ceux sans limitation, avec un seuil de distance parcourue compris entre 130 et 150 mètres. En 2014, une revue de littérature menée par Pin [84] a confirmé l'excellente reproductibilité intra-évaluateur (ICC 0,90-0,96) et inter-évaluateur (ICC 0,98-0,99), ainsi qu'une reproductibilité test-retest solide (IC95 0,71-0,90).

Ce test est corrélé aux capacités de marche et d'endurance du patient même s'il est moins énergivore que le TM6.

Il a également pour avantage d'être sensible au changement ainsi que facilement reproductible pour des évaluations successives, garantissant ainsi une comparaison cohérente des résultats au fil du temps. Le minimal détectable change (MDC) est de 34.3m chez la personne amputée de membre inférieur [85].

Pour la réalisation de ce test, il est nécessaire d'avoir à disposition : un couloir de 30

mètres, des graduations tous les 5 mètres, un chronomètre, deux cônes (demi-tour), une chaise mobilisable dans le couloir, une aide technique si besoin, un saturomètre, un cardio-fréquence mètre, une échelle visuelle analogique d'évaluation de la dyspnée (échelle de Borg modifiée).

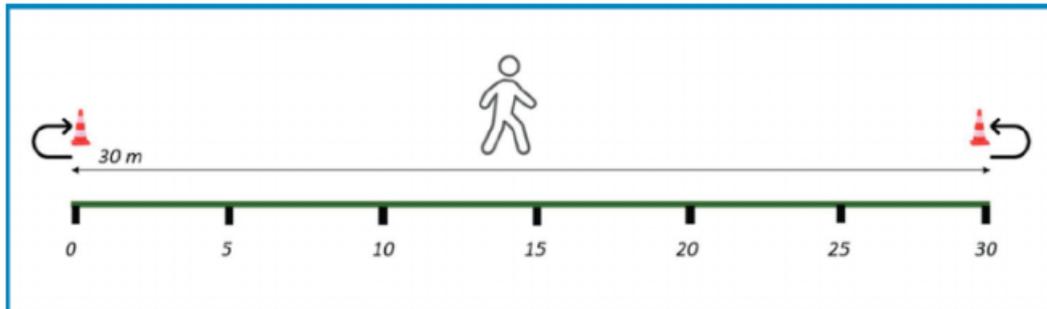


Figure 5. Dispositif du test avec deux cônes espacés de 30 m et les marquages au sol tous les 5 m. (D'après Reinmann et al.[86])

Le test se déroulera comme suit, basé sur les recommandations de Vancampfort et al. in Reinmann et al. [86,87]:

Avant l'épreuve :

- Repos de 5 minutes, en position assise
- Prise de la fréquence cardiaque, saturation, échelle de Borg

Instructions au patient :

- « L'objectif de ce test est de marcher aussi loin que possible pendant 2 minutes. Vous allez marcher en aller-retour dans ce couloir. Marchez en continu si possible, mais ne vous inquiétez pas si vous devez ralentir ou vous arrêter pour vous reposer. Le but est qu'à la fin du test, vous ayez le sentiment que vous n'auriez pas pu couvrir plus de distance en 2 minutes. N'oubliez pas que l'objectif est de marcher aussi loin que possible pendant 2 minutes, mais ne courez pas et ne trottinez pas. Démarrez quand je vous dirai GO »

- « 3, 2, 1, GO »

A 1 minute :

- « Vous vous débrouillez bien, il vous reste 1 minute »

A 2 minutes :

- Et maintenant, arrêtez-vous »

Le périmètre parcouru sera calculé et noté à la fin du test. L'examineur marche systématiquement derrière le patient afin de ne pas influencer son allure [84].

Les pauses sont autorisées durant le test, avec une reprise de la marche dès que possible.

A la fin du test, on note également le niveau de dyspnée grâce à l'échelle de Borg. Le patient se repose en continuant à marcher lentement ou en s'asseyant.

5.2 Critères de jugement secondaires

Critère de jugement secondaire n°1 permettant de répondre à l'objectif secondaire

n°1 : **Paramètres d'analyse fonctionnelle de la marche (AFM) Zéno.**

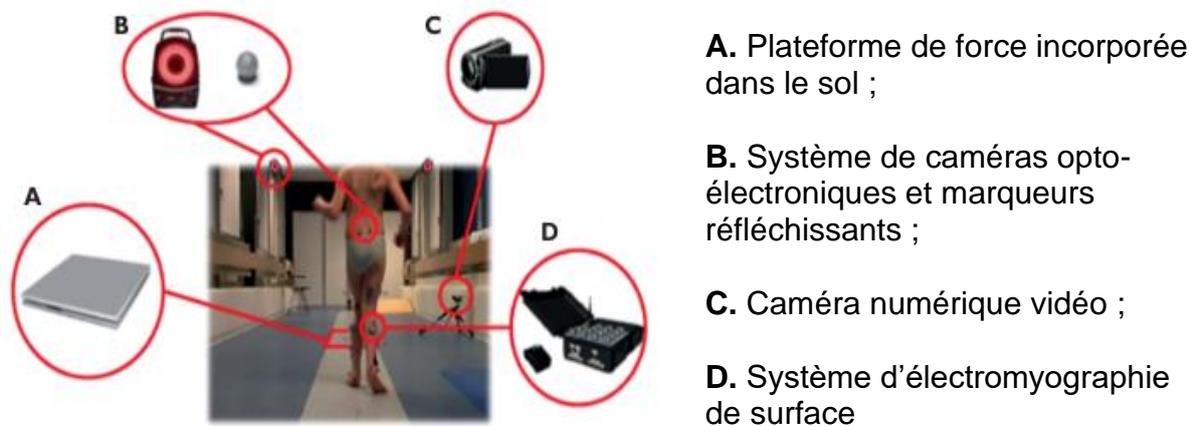
Dans la littérature, le terme d'analyse quantifiée de la marche (AQM) est parfois employé de manière étendue, même lorsque l'analyse réalisée n'inclut pas tous les aspects généralement associés à cette méthode, ce qui peut prêter à confusion. Il s'agit d'un examen médical utile pour la prise en charge de patients présentant des

troubles de la marche, particulièrement chez la population amputée [88]. Elle est ordonnancée sur prescription médicale.

L'enregistrement complet de la marche implique la capture de données [89] :

- Spatio-temporelles (vitesse, cadence, longueur et largeur de pas, durée et proportion de chaque cycle)
- Cinématiques (variation angulaire des articulations et segments de membres)
- Cinétiques (forces et puissance segmentaire)
- Électromyographiques (périodes et intensité des contractions musculaires)
- Pressions plantaires

Dans ce cas de figure, certains outils supplémentaires sont intégrés à un tapis de marche (capteurs électromyographiques, des caméras numériques, un système optoélectronique, une plateforme de forces, etc...).



*Figure 6. Matériel d'analyse quantifié de la marche.
(D'après Armand et al. [89])*

Dans le cadre de notre étude, **nous utiliserons l'appareil d'analyse fonctionnelle de la marche (AFM) disponible dans le centre de rééducation de Oignies, à savoir le « Zeno » de la société SAMMED.**

Il se compose d'un tapis de marche équipé de capteurs de pression (14 niveaux de pression), de caméras et d'un logiciel d'analyse (logiciel PKMAS).

Ce dispositif permet d'enregistrer la marche d'une personne qu'elle soit réalisée avec ou sans aide technique.

Concernant son déroulement, il est demandé au patient de marcher sur le tapis dont la distance fait 7.93 mètres, placé dans un couloir, sans élément distracteur visuel ou sonore aux alentours. Il peut utiliser si nécessaire une aide technique. En fonction des besoins de l'examen et des capacités du patient, plusieurs allers-retours seront effectués et enregistrés. L'examen se terminera lorsque l'évaluateur estimera avoir recueilli un nombre suffisant de cycles de marche pour représenter fidèlement la démarche du patient.

Nous évaluerons et retiendrons les paramètres suivants :

- **Vitesse de marche (mètre/seconde)**
- **Longueur du pas (mètre)**, afin d'évaluer le pourcentage d'asymétrie lors de la comparaison côté appareillé / côté sain.
- **Quantité d'appui ou pression plantaire (Unité arbitraire, UA)**, également pour évaluer le pourcentage d'asymétrie entre côté sain et côté appareillé

Critère de jugement secondaire n°2 permettant de répondre à l'objectif secondaire

n°2 : L-TEST

Le L-Test est une modification du Timed Up & Go test, créé dans le but de s'affranchir de l'effet plafond facilement atteignable de ce dernier [90].

Cet effet plafond est en effet un problème rencontré dans l'étude de Saruco et al. [81].

Tous deux sont des tests quantitatifs puisqu'ils un temps pour réaliser un parcours prédéfini.

Ils se déroulent comme suit :

- TUG : le sujet est assis sur une chaise avec accoudoirs, doit se lever, marcher 3 mètres, faire demi-tour, et venir s'asseoir à nouveau.
- L-Test : Le sujet est assis sur une chaise avec des accoudoirs, doit se lever, marcher 3 mètres, tourner à 90°, marcher 7 mètres, faire demi-tour, parcourir à nouveau ce trajet dans le sens inverse et se rasseoir sur cette même chaise.

Le parcours du L-Test a donc la forme d'un « L » avec une distance à parcourir de 20 mètres, deux transferts et quatre virages (si l'on considère le retournement pour se rasseoir). En voici une représentation :

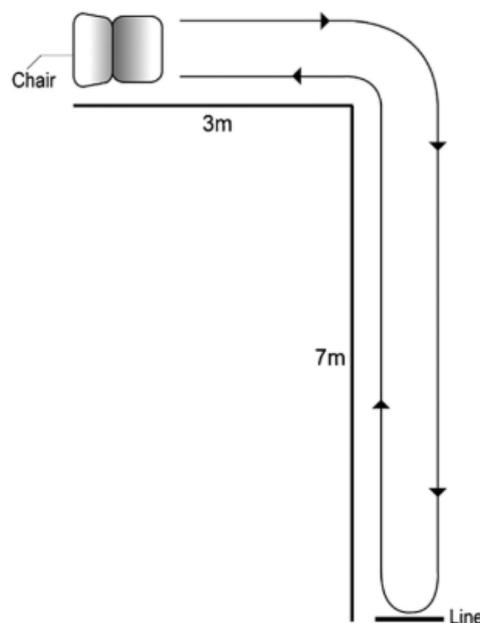


Figure 7. Représentation du L-Test. (D'après Kim et al. [91])

Le patient réalise un total de 3 essais afin de minimiser les effets de la variabilité inter-essais, il est ensuite choisi de conserver le meilleur parmi les trois.

Ce test a été validé chez l'amputé, a montré une bonne fiabilité test-retest (ICC 0.77) [90] et une excellente validité intra et inter examinateur (respectivement ICC 0.99 – 1.00 et ICC 0.95 – 0.98) ainsi qu'une très forte corrélation avec le TUG ($r = 0.96$; $p < 0.01$) [92].

Le Minimal Clinically Important Difference (MCID) est de 4.5 secondes [93]. Le résultat moyen dans la population amputée de membre inférieur est de 42.0 secondes avec un écart type de 17.8 secondes.

Critère de jugement secondaire n°3 permettant de répondre à l'objectif secondaire n°3 : TAPES-R-F (Trinity Amputation and Prosthesis Experience Scales-Revised-version Française)

Cette approche d'évaluation repose sur l'utilisation d'un auto-questionnaire pour évaluer l'adaptation multidimensionnelle des patients à leurs prothèses à travers 33 items. Elle vise à mesurer le niveau d'adaptation du patient à son amputation, l'impact de cette amputation sur ses activités quotidiennes, ainsi que son degré de satisfaction à l'égard de sa prothèse.

La version française de ce questionnaire a été validée par l'équipe de Luthi et al en 2020 [94].

Il a l'avantage de ne nécessiter que peu de temps pour le réaliser.

La fiabilité test-retest est bonne à excellente pour toutes les sous échelles (ICC entre 0.61 et 0.89).

Son unique défaut est un effet plafond potentiel concernant les trois sous-catégories de la première section.

Elle se compose donc de trois parties :

- La section sur l'adaptation psychosociale comporte trois sous-catégories mesurant l'adaptation globale, sociale et aux limitations potentiellement engendrées. Elle totalise 15 items, chacun noté sur une échelle de 4 points, de "pas du tout d'accord" (1) à "totalement d'accord" (4). Un score plus élevé indique un meilleur niveau d'adaptation.
- La section sur les limitations dans les activités est divisée en trois sous-groupes : les limitations dans les activités fonctionnelles, sociales et sportives. Les 10 items de cette section sont notés sur une échelle de 3 points, allant de "très limité" (2) à "pas du tout limité" (0). Un score élevé indique une plus grande limitation dans ces activités.
- La satisfaction à l'égard de la prothèse est évaluée à travers trois sous-catégories. La satisfaction esthétique concerne l'appréciation esthétique de la prothèse en termes de forme, couleur et apparence. La satisfaction fonctionnelle évalue le degré de contentement lié à des caractéristiques fonctionnelles telles que le poids, l'utilité, la fiabilité, l'ajustement et le confort. Chaque élément est noté sur une échelle de trois points, allant de "insatisfait" (1) à "très satisfait" (3). Un score plus élevé indique une plus grande satisfaction à l'égard de la prothèse.

Enfin, une note globale de satisfaction, notée de 0 ("pas du tout satisfait") à 10 ("très satisfait"), est attribuée à la fin du questionnaire.

Ce questionnaire est disponible en annexe 1.

Critère de jugement secondaire n°4 permettant de répondre à l'objectif secondaire

n°4: **SIGAM-FR (St George's Impairment and Activity Measure - French Version)**

Il s'agit d'un outil d'évaluation standardisé destiné à mesurer les capacités fonctionnelles chez les patients amputés de membre inférieur. La version française a été validée par par Jousain et al. en 2015 [95].

Le SIGAM est un auto-questionnaire comprenant 21 questions à réponse fermée (oui/non) avec un large éventail de mesures et comporte six grades (A à F). Le grade A correspondant à un sujet n'utilisant pas sa prothèse et le grade F à un sujet pouvant marcher avec sa prothèse sans aide technique, sans limitation de distance quel que soit le temps, sur n'importe quelle surface. Il évalue la déambulation en termes d'aides humaines, d'aides techniques, de périmètre de marche, et la capacité à négocier différents terrains et conditions météorologiques.

Il bénéficie d'une bonne reproductibilité et est sensible au changement [96].

La réalisation de cet auto-questionnaire nécessite une expérience à domicile, raison pour laquelle nous ne le réaliserons que lors de la dernière visite (T3) pour une évaluation qualitative de la vie quotidienne.

Ce questionnaire est disponible en annexe 2.

6 Statistiques

6.1 Nombre de sujets nécessaires

Pour estimer le nombre de sujets nécessaires, nous nous sommes basés sur des données issues de la littérature. Chez les amputés classés comme à haut risque cardio-vasculaire dans l'étude de *Gaunard et al. (2020)* [97], la distance moyenne parcourue au test de marche de 2 minutes (TM2) est de 130.6 mètres, avec un écart-type de 34.7 mètres. Les patients dont l'étiologie était médicale (vasculaire, néoplasique, infectieuse) avaient des distances similaires soit 130.9 mètres +/- 35.0 mètres.

Le changement minimal détectable (MDC) est de 34.3 mètres [85].

Nous avons formulé l'hypothèse que la moyenne de la distance parcourue au TM2 serait de 131 mètres dans le groupe « relaxation » et de 165 mètres dans le groupe « imagerie motrice », soit une différence attendue de 34 mètres. Avec un niveau de confiance fixé à 95% (alpha à 5%) et une puissance statistique de 80% (beta à 20%), en utilisant une hypothèse bilatérale de différence entre les moyennes du TM2 dans les deux groupes, et en tenant compte d'un taux de perte de suivi à seulement 10% en raison de la courte durée maximale de rééducation de trois mois, il a été calculé qu'un échantillon de **18 patients par groupe** est nécessaire.

Au vu des PMSI du centre de réadaptation « Les Hautois », il est attendu sur la période d'étude définie de 18 mois un recrutement de 40 patients environ, ce qui devrait permettre d'atteindre ce nombre.

6.2 Méthodologie statistique

L'ensemble des caractéristiques démographiques et cliniques des patients seront décrites à l'aide de statistiques usuelles. Les variables continues seront présentées sous forme de moyennes et d'écart-types ou de médianes et de Q1-Q3/IQR selon la distribution des données. Les variables catégorielles seront résumées par des fréquences et des pourcentages. Celles-ci seront ensuite comparées entre les groupes d'intervention par des tests de Chi² ou test de Fisher, et test de Student ou Wilcoxon selon les conditions de validité des modèles.

Les scores obtenus aux trois temps de mesure (T1, T2, T3) seront décrits par leur moyenne, écart-types, médianes, et Q1-Q3/IQR.

Des graphiques tels que des courbes de tendances et des boîtes à moustaches (box plots) seront utilisés pour visualiser les variations des scores dans le temps et entre les groupes. Les scores seront comparés, spécifiquement au temps T1, entre les deux groupes d'intervention par un test de Student ou Wilcoxon selon la distribution des scores.

6.2.1 Analyse principale

L'analyse se fera en *intention to treat* (ITT), incluant tous les patients randomisés ayant suivi intégralement le protocole de rééducation. Une analyse de sensibilité pourra être réalisée en *intention to treat*.

L'évaluation de la capacité de la marche se fera par la différence du score entre la mesure du TM2 entre T1 et T3. La différence moyenne sera comparée entre les groupes d'intervention « relaxation » et « imagerie motrice », en contrôlant sur la valeur à T1 et sur les facteurs de confusion potentiels par un modèle linéaire généralisé.

Les facteurs de confusion seront sélectionnés à priori sur la base des données de la littérature.

Parmi les facteurs de confusion, nous tiendrons compte du type de pied prothétique utilisé, qui pourrait influencer la performance de la marche, ainsi que le niveau d'activité physique antérieur à la chirurgie.

Des analyses en sous-groupe seront réalisés en ce sens pour explorer l'influence de ces facteurs.

6.2.2 Analyses secondaires

L'évaluation de la capacité de la marche se fera également par le TM2 à T1, T2 et T3, en considérant les mesures répétées au cours du temps par un modèle linéaire mixte. Le modèle inclura des effets fixes pour le groupe d'intervention, le temps de mesure, et l'interaction entre le groupe d'intervention et le temps. Un effet aléatoire pour les sujets sera inclus pour capturer la variabilité inter-sujets.

Un modèle linéaire mixte sera également utilisé pour comparer les résultats obtenus aux trois temps (T1, T2, T3) dans les deux groupes d'intervention pour les critères de jugement secondaires tels que le L-test, la quantification de la marche (asymétrie de pas, asymétrie en quantité d'appui et vitesse de marche).

Le niveau fonctionnel de la prothèse au temps final T3 sera évalué par une

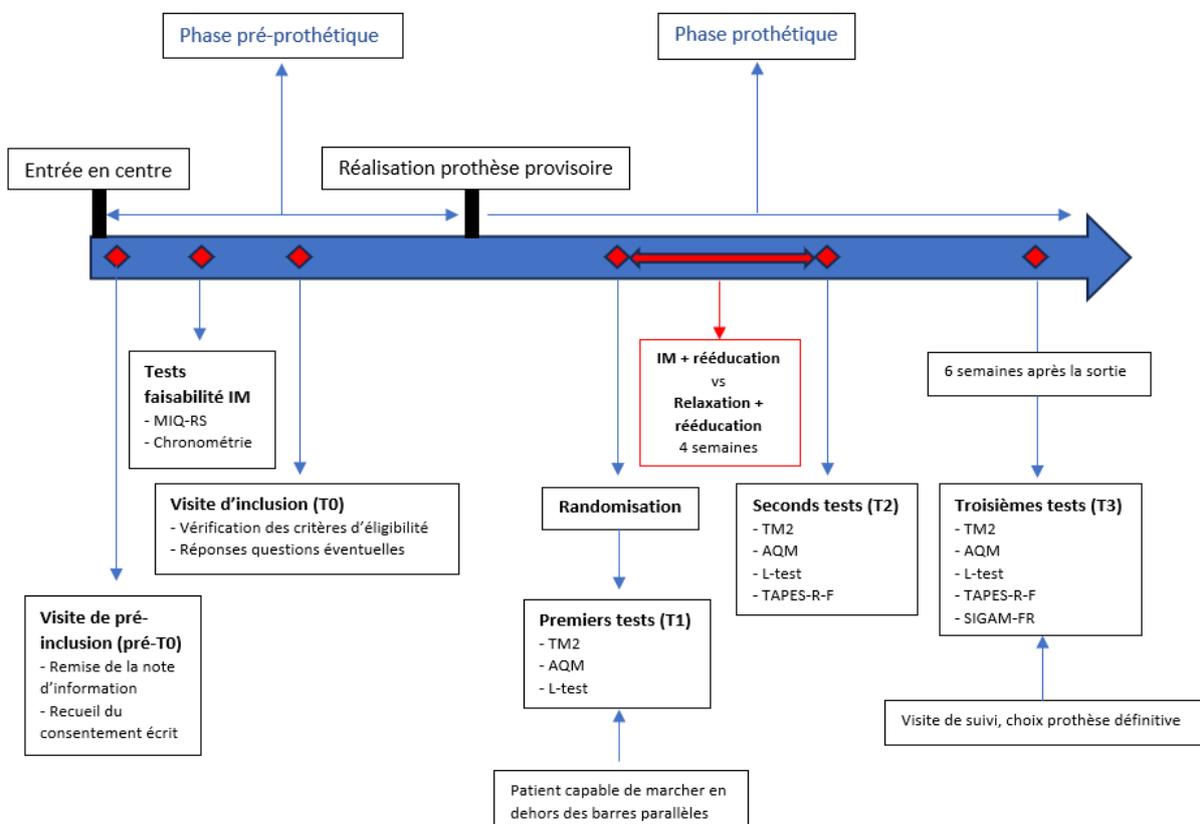
comparaison du grade obtenu au questionnaire SIGAM-fr entre les deux groupes d'intervention par une régression logistique ordinale.

Enfin l'expérience générale de l'utilisation de la prothèse, mesurée par le questionnaire TAPES-R-F, sera également évaluée par un modèle linéaire mixte mais uniquement aux temps T2 et T3.

Pour tout test statistique effectué, le seuil de signification sera fixé à 0.05.

7 Déroulement de l'étude

7.1 Schéma de l'étude



7.2 Visite de pré-inclusion (pré-T0)

Cette visite initiale servira non seulement à accueillir le patient, mais aussi à lui fournir toutes les informations nécessaires concernant l'étude.

Tout d'abord, les principes et objectifs et l'étude seront expliqués de manière claire et accessible. L'accent sera mis sur l'intérêt de cette étude cherchant à améliorer les soins et les résultats fonctionnels des patients amputés, chez qui l'intérêt de la pratique de l'IM n'a pas encore été réellement prouvée en raison du manque de donnée dans la littérature. Le patient recevra une note d'information détaillée (disponible en [annexe 3](#)), qui décrit les différentes étapes de l'étude, les interventions prévues, ainsi que les droits et obligations des participants. Cette note servira de support pour une compréhension plus approfondie et permettra au patient de revoir les informations à tête reposée.

Après la présentation des informations, un recueil de consentement sera remis au patient (disponible en [annexe 4](#)). Celui-ci sera invité à lire ce document avec attention et à poser toutes les questions nécessaires.

Le dernier point de cette visite sera dédié à l'explication de la nécessité de réaliser des tests de faisabilité de l'imagerie motrice, à savoir le MIQ-RS et la chronométrie mentale. Il sera également expliqué qu'après ces évaluations, un processus de randomisation sera mis en place pour déterminer l'attribution du patient à l'un des groupes d'étude.

Nous devons obtenir le consentement écrit à la fin cette visite, car les tests de faisabilité que nous voulons réalisés peu de temps après font partie intégrante de

l'étude.

7.3 Tests de faisabilité

Ceux-ci visent à évaluer la capacité ou non du patient à réaliser l'IM. Un échec lors de la réalisation de l'un de ces tests cochera l'un des critères de non inclusion à l'étude.

Nous utiliserons l'association d'un questionnaire d'IM évaluant la vivacité des représentations mentales, en l'occurrence le MIQ-RS qui évalue la modalité kinesthésique en perspective interne et visuelle en perspective externe, à la chronométrie mentale (TDMI et test de congruence temporelle) puisqu'il s'agit de l'association la plus pertinente et la plus utilisée à l'heure actuelle (*Malouin et Richards, 2010*).

Notre choix s'est porté vers le MIQ-RS plutôt que le KVIQ en raison de son temps de réalisation plus court, son échelle de Likert plus grande permettant un plus large choix de réponse afin de coter sa vivacité, ainsi qu'en raison de l'intégration de mouvements fonctionnels semblant plus pertinent selon nous qu'uniquement des mouvements simples des extrémités. De plus il se réalise également assis et est adapté aux patients amputés. Il n'existe à l'heure actuelle aucun seuil permettant de juger un individu comme véritablement capable de réaliser l'IM. Cependant, il est établi dans la version antérieure « MIQ-R » un seuil significatif de 25/56, ce qui nous donnerait un ratio à 21.8 pour le MIQ-RS. Nous utiliserons le **cut-off de 21/49** par sous échelle pour cette étude, ce qui équivaut à une moyenne de 3/7 à chaque item.

Le TDMI (*Malouin et al. 2008*) sera utilisé de la façon suivante : nous demanderons au patient de s'imaginer réaliser un mouvement de steppage avec son moignon durant 15 puis 45 puis 25 secondes, puis de nous relater le nombre de pas effectués lors de chaque période de temps. S'il est constaté une augmentation du nombre de pas concordante avec l'augmentation des durées respectives associé à une croissance relativement linéaire, le test sera considéré comme réussi. Dans le cas contraire, le patient ne sera pas inclus.

Concernant la congruence temporelle, le patient devra s'imaginer réaliser 5 mouvements d'abduction du membre lésé, puis les exécuter physiquement. **Un rapport entre 0,7 et 1,3** entre le temps du mouvement imaginé et celui du mouvement exécuté sera considéré comme acceptable (il n'a été retrouvé aucun cut off dans la littérature, même si ce test de faisabilité est largement admis). Si ce rapport n'est pas respecté, le test sera jugé non concluant, et le patient ne sera pas inclus dans l'étude.

7.4 Visite d'inclusion (T0)

Lors de la visite d'inclusion, l'objectif principal sera de confirmer l'éligibilité du patient à participer à l'étude en répondant à chaque critère d'inclusion et non inclusion, prenant en compte les résultats des critères de faisabilité qui auront été évalués en amont comme expliqué ci-dessus, ainsi que la réalisation du MMSE.

En plus de l'évaluation de ces critères de faisabilité, cette visite permettra de recueillir l'ensemble des informations nécessaires pour le cahier d'observation, incluant les données cliniques et démographiques du patient.

Parmi les principales données nous recueillerons : âge, sexe, taille, poids, IMC, antécédents médico-chirurgicaux, côté de l'amputation (dominant ou non), longueur du moignon, évaluation du niveau d'activité physique avant amputation (par l'intermédiaire du IPAQ-SF), nécessité d'une aide technique ou non avant l'amputation, nombre de jours depuis la chirurgie lors de l'entrée en centre de rééducation, MIF à l'entrée.

Le cahier d'observation est disponible en annexe 5.

Nous réaliserons également l'IPAQ-SF comment questionnaire afin d'évaluer le niveau d'activité physique en amont de la chirurgie.

Un temps d'échange aura lieu afin de répondre à l'ensemble des questions éventuelles du patient.

7.5 Première phase de tests (T1)

L'ensemble des patients intégrant l'étude réaliseront dans un premier temps une rééducation classique depuis la phase initiale pré-prothétique jusqu'à acquérir une capacité de marche permettant de sortir des barres parallèles et marcher durant deux minutes, qu'ils utilisent une aide technique ou non.

La randomisation des patients sera alors effectuée à ce moment, juste en amont des premiers tests. Ce choix est guidé par des recommandations méthodologiques stipulant l'intérêt de réaliser la randomisation le plus tard possible (*Lepcam*), afin d'éviter les perdus de vue entre la randomisation et le début de l'intervention. En effet l'intervention débutera juste après les tests, et les groupes doivent être formés en

amont de ces derniers. Dans le cas contraire cela pourrait entraîner des biais, notamment un biais d'information (ou de mesure).

A ce stade, la première phase de test pour être débutée, comprenant :

- **TM2**
- **Asymétrie de Longueur de Pas (AFM)**
- **Asymétrie de Quantité d'Appui au Sol (AFM)**
- **Vitesse de Marche (AFM)**
- **L-test**

L'intervention que nous apportons dans le cadre de cette étude débutera juste après ces tests cliniques, à raison de 3 séances par semaine pour une durée totale de 4 semaines.

7.6 Deuxième phase de tests (T2)

Suite aux premiers tests, l'intervention débute, à raison de 3 séances par semaines pendant 4 semaines au total quel que soit le groupe. Les modalités des séances (IM et relaxation) sont détaillées ci-après dans la partie dédiée.

Pour ce qui est de l'imagerie motrice, nous nous concentrerons uniquement sur le travail de la marche, puis des activités supérieures de la marche en fin de protocole. Nous expliquerons au patient le cycle de marche d'un amputé trans-tibial en amont (avant la première séance) pour pouvoir parfois travailler chaque séquence du cycle notamment au début, afin également de ce dernier ait quelques connaissances

théoriques au préalable, pouvant l'engager un peu plus dans sa prise en charge.

Le protocole se découpera globalement en 4 phases, offrant un niveau de difficulté croissant :

- Phase 1 : Travail qualitatif du cycle de marche, dont l'objectif est de travailler les différentes parties du cycle en se concentrant sur la qualité des mouvements.
- Phase 2 : Travail quantitatif et qualitatif du cycle de marche, dont l'objectif est de passer à une imagerie du cycle entier sur quelques pas.
- Phase 3 : Travail des transferts, notamment assis debout, avec poursuite du travail de marche entre le lever et le retour à la position assise, incluant donc un demi-tour.
- Phase 4 : Travail des activités supérieures de la marche et mise en situation de la vie quotidienne.

Des outils tel qu'un métronome seront utilisés à certains moments afin de guider la cadence, aider à la visualisation et travailler la symétrie de pas. Ce rythme auditif des pas permettrait un effet positif plus important dans l'amélioration des capacités locomotrices [98]. Le protocole est détaillé ci-après.

En ce qui concerne la relaxation, la méthode Jacobson sera réalisée, se découplant en 4 phases, le patient bénéficiera d'une phase par semaine. Les modalités sont également détaillées ci-après.

Evidemment, de façon concomitante, l'ensemble des patients bénéficieront du même programme de rééducation classiquement réalisé dans le centre en dehors de ces

séances spécifiques. Nous nous assurerons que le nombre de séances et donc le temps de rééducation soit identique pour tous les patients.

À la fin des 4 semaines d'intervention, la deuxième phase de test sera réalisée pour évaluer les progrès réalisés. Cette phase de test sera similaire à la première, avec l'ajout d'une nouvelle évaluation pour mesurer l'adaptation multidimensionnelle des patients à leur prothèse par l'intermédiaire du TAPES-R-F. Les tests suivants seront donc effectués :

- **TM2**
- **Asymétrie de Longueur de Pas (AFM)**
- **Asymétrie de Quantité d'Appui au Sol (AFM)**
- **Vitesse de Marche (AFM)**
- **L-test**
- **TAPES-R-F**

7.7 Troisième phase de tests (T3)

Conformément aux procédures habituelles du centre, les patients amputés seront revus en consultation de suivi environ six semaines après leur sortie d'hospitalisation. Cette visite de suivi a pour objectif d'évaluer leur adaptation à la prothèse dans la vie quotidienne et de préparer la réalisation de la prothèse définitive.

Cette phase de test sera similaire à la deuxième, en y ajoutant le questionnaire SIGAM-FR permettant de quantifier les capacités fonctionnelles au domicile.

Les tests suivants seront donc effectués :

- **TM2**
- **Asymétrie de Longueur de Pas (AFM) :**
- **Asymétrie de Quantité d'Appui au Sol (AFM)**
- **Vitesse de Marche (AFM)**
- **L-test :**
- **TAPES-R-F**
- **SIGAM-FR**

Il ne sera pas demandé au patient de réaliser des séances d'imagerie motrice en autonomie, même si cela peut être intéressant, il s'agira d'un point soulevé dans la partie discussion.

Dans un soucis d'éthique, le travail en imagerie motrice sera expliqué en détail aux patients du groupe contrôle après la réalisation de ces tests puisqu'il s'agira de la fin de leur implication dans cette étude.

8 Protocole d'imagerie motrice

Ce protocole est créé à partir des règles de recommandations de bonne pratique citées précédemment [30,32,68]. Les séances seront réalisées par un.e psychomotricien.ne formé.e à la pratique de l'imagerie motrice.

Nous avons souhaité le **standardiser**, en réalisant une description précise des consignes, afin que chaque patient reçoive exactement les mêmes instructions de la

part du thérapeute.

Les séances se dérouleront dans une salle en interaction directe avec le thérapeute (psychomotricien), sans présence de distracteurs extérieurs. Le patient amputé portera sa prothèse durant la séance et adoptera une position aussi proche que possible de celle imaginée (par exemple, debout lors de l'imagerie de la marche), sous réserve que ses capacités physiques et fonctionnelles le permettent.. La perspective interne et la modalité kinesthésique seront privilégiées, même si la perspective externe sera également utilisée. Un support vidéo pour analyser la posture et le schéma de marche sur le plan frontal et sagittal sera parfois utilisé, le plus souvent en début de séance. Ce support vidéo proviendra de la marche d'une tierce personne amputée avec un bon schéma de marche, ou également de la propre marche du patient, afin de l'analyser et apporter des conseils spécifiques.

Chaque exercice sera détaillé sur les points essentiels à comprendre et percevoir durant la réalisation de la pratique mentale d'imagerie motrice.

Un point sera également fait sur l'importance de conserver les caractéristiques spatio-temporelles du mouvement travaillé avec le mouvement réel.

Ces séances seront réalisés le plus possible après une séance de kinésithérapie.

Pour conclure, nous réaliserons lorsque cela est possible de courtes pratiques physique comme le stipule l'étude de *Malouin et al en 2013* [68] (ratio pouvant généralement aller de 2PM pour 1PP à 10PM pour 1PP selon les études). L'objectif est de fournir, grâce à la PP concomitante, des informations proprioceptives facilitant la stimulation corticospinale [99].

Nous réaliserons les séances dans une salle bénéficiant de barres parallèles, si cela

n'est pas possible le patient bénéficiera d'un déambulateur, finalement si le patient en est capable et peu fatigué, les pratiques physiques seront réalisées sans aide technique.

A noter que les séances d'IM seront réalisées le plus souvent l'après-midi, en effet Gueugneau et al. [100] ont montré une action du rythme circadien sur la vivacité des images ainsi que sur l'isochronie. En effet ces deux paramètres semblent de meilleure qualité entre 14h et 18h que le matin ou le soir.

Il a été utilisé comme support, pour créer ce protocole, les travaux de *Dunsky et al.* [70] expliquant leur protocole d'imagerie motrice dans les grandes lignes, réalisé sur un temps de 6 semaines chez des patients hémi-parétique post AVC.

Leur protocole mettait en évidence un niveau de difficulté croissant, l'utilisation de la perspective interne mais également externe, ainsi que l'utilisation d'un métronome pour aider le sujet à avoir une cadence régulière (à son propre rythme initialement, puis par la suite à un rythme plus élevé).

Les principaux objectifs de l'entraînement étaient de faciliter les mouvements du membre inférieur affecté et d'améliorer la posture en se concentrant sur des problèmes spécifiques (par exemple, le contact initial de l'avant-pied ou la propulsion) et de favoriser la marche fonctionnelle dans l'environnement du patient. La complexité de la tâche pendant l'imagerie motrice a donc été augmentée progressivement, de la familiarisation avec l'imagerie motrice de la marche dans un endroit isolé, sur un terrain plat et sans perturbation (semaine 1), à des situations plus complexes telles qu'imaginer marcher vers des cibles significatives au domicile du patient et à l'extérieur pour augmenter la vitesse et la symétrie de la marche (semaines 5 et 6).

Les travaux de Vanmairis [79] ont également inspiré ce protocole.

Chaque séance :

- débutera par une séquence de relaxation de 2 minutes.
- Finira par 3 minutes de recentrage dans la pièce et récupération
- Une discussion autour du travail effectué sera enfin réalisée durant environ 5 minutes

Ceci associé à un travail spécifique en IM de 20 minutes, la durée totale de séance sera de 30 minutes.

Pour terminer, le cycle de marche sera expliqué comme suit au patient :

« Un cycle complet est défini par la réalisation d'une foulée, soit un pas réalisé par chaque membre inférieur. Il commence par le contact initial du pied au sol et se termine juste avant le contact initial suivant de ce même pied. Le cycle de marche est divisé en deux phases. La première est la phase d'appui, durant laquelle le membre inférieur est en contact avec le sol. La seconde est la phase oscillante, durant laquelle le pied avance dans l'air (*Delafontaine*).

Phase d'appui : 60% du cycle.

- Mise en charge avec contact initial du pied au sol par le talon avec transfert du poids vers la jambe en phase d'appui, jusqu'à ce que le pied controlatéral quitte le sol.
- Milieu de phase d'appui où le pied est à plat et se termine quand le talon décolle du sol
- Fin de la phase d'appui lorsque l'appui se termine par l'avant pied

- Phase pré-oscillante débutant quand le pied controlatéral touche le sol et se termine quand le pied ipsilatéral quitte le sol

Phase oscillante : 40% du cycle.

- Début de l'oscillation se terminant lorsque le pied oscillant croise la jambe controlatérale.
- Milieu d'oscillation quand le tibia se situe à la verticale et amorce l'attaque du prochain pas.
- Fin d'oscillation jusqu'à ce que le pied rentre de nouveau en contact avec le sol. »

Voici le détail ci-après des séances portant spécifiquement sur le travail de la marche en IM.

A noter, lorsqu'un temps de pause entre les répétitions mentales est spécifié, l'examineur peut réaliser un temps de contrôle de la qualité d'imagerie, utilisant une cotation sur échelle de Likert allant de 1 à 7, et/ou en demandant au patient de décrire ses sensations ou les difficultés rencontrées.

8.1 Phase 1 (travail qualitatif du schéma de marche) : Séances 1 à 3.

Séance 1 : Phase portante, côté prothétique.

Partie 1 (environ 5 min) : Analyse vidéo et décomposition du cycle de marche

- **Objectif** : Comprendre les différentes phases du cycle de marche.
- **Activité** :

- Visionnage d'une vidéo montrant la marche d'un patient amputé.
- Analyse détaillée des différentes phases du cycle de marche, avec un focus particulier sur la phase d'appui du côté prothétique.
- **Commentaire** : « Observez attentivement comment le pied prothétique entre en contact avec le sol, supporte le poids du corps, puis se prépare à la propulsion. »

Partie 2 (environ 5 min) : Imagerie motrice du début et milieu de phase d'appui

- **Objectif** : Se concentrer sur l'amorce et le maintien de la phase d'appui.
- **Guidance** :
 - « Commencez par visualiser le début du pas. Imaginez le moment où votre talon prothétique touche le sol. Concentrez-vous sur ce contact initial, puis sur le transfert progressif de votre poids vers la prothèse. »
 - « Ressentez la pression qui s'exerce sur votre talon, puis sur l'ensemble du pied prothétique, jusqu'à ce que votre poids repose presque entièrement sur la prothèse. »
 - « Soyez attentif à l'effort nécessaire pour maintenir l'équilibre et à la contraction des muscles, en particulier les fessiers, qui vous aident à stabiliser votre corps, et le quadriceps qui verrouille le genou. »
 - L'exercice est réalisé debout si possible, avec support si besoin.
 - **Répétition** : Répétez cet exercice mental pendant 2 minutes.
 - **Pratique physique** : « Maintenant, levez-vous et essayons de reproduire physiquement ces sensations, en vous concentrant sur l'équilibre et la contraction musculaire que vous venez d'imaginer. »
 - **Répétition** : Nous répétons cet exercice une seconde fois.

Partie 3 (environ 5 min): Imagerie motrice de la fin de phase d'appui et phase pré-oscillante

- **Objectif** : Travailler la transition entre la phase d'appui et la phase pré-oscillante.
- **Guidance** :
 - « Visualisez maintenant la fin de la phase d'appui. Imaginez que votre pied prothétique se prépare à propulser votre corps vers l'avant. »
 - « Concentrez-vous sur la sensation du poids du corps qui se déplace vers l'avant du pied prothétique, juste avant que la prothèse ne quitte le sol. »
 - « Ressentez la poussée qui vous propulse vers l'avant, et la transition du poids de votre corps vers le côté sain. »
 - « Imaginez la prothèse quitter le sol, se préparant à entrer dans la phase d'oscillation. »
 - **Répétition** : Répétez cet exercice mental pendant 2 minutes.
 - **Pratique physique** : « Maintenant, mettons-nous debout et reproduisons ce premier pas, en essayant de ressentir physiquement les sensations que vous venez d'imaginer. »
 - **Répétition** : Nous répétons cet exercice une seconde fois

Partie 4 (environ 5 min) : Contrôle de la qualité de l'imagerie par l'examineur et intégration de la phase complète d'appui.

- **Objectif** : Vérifier la précision de l'imagerie et synthétiser les éléments travaillés.

- **Contrôle :**
 - **Interaction avec l'examineur :** L'examineur intervient pour évaluer la qualité de l'imagerie mentale réalisée par le sujet. Le patient décrit en détail les sensations et images mentales perçues, tandis que l'examineur vérifie que ces descriptions sont cohérentes avec les objectifs de la séance.
 - Demande de cotation sur échelle de Likert allant de 1 à 7.
 - **Feedback :** Si nécessaire, des ajustements sont proposés pour affiner la précision de l'imagerie, notamment l'utilisation de la perspective externe dans cette fin de séance si le patient y trouve plus de facilité, afin de ne pas perdre sa motivation.
- **Guidance :**
 - « Revoyons maintenant l'ensemble de cette séquence, en commençant par l'attaque talon jusqu'à la propulsion et la transition vers le côté sain. »
 - **Répétition :** Répétez cet exercice mental pendant 2 minutes.
 - **Pause :** Prenez une pause d'une minute.
 - **Répétition puis pratique physique :** « Nous allons maintenant répéter cet exercice une seconde fois pendant 1 minute, puis nous ferons une courte séquence de marche réelle. Cela vous aidera à consolider les sensations que vous avez imaginées et à mieux les ressentir lors de la prochaine séance. »

Séance 2 : Phase oscillante, côté prothétique

Partie 1 (environ 5 min) : Analyse vidéo et décomposition du cycle de marche

- **Objectif** : Comprendre les différentes phases du cycle de marche.
- **Activité** :
 - Visionnage d'une vidéo montrant la marche d'un patient amputé.
 - Analyse détaillée des différentes phases du cycle de marche, avec un focus particulier sur la phase d'oscillation du côté prothétique.
 - **Commentaire** : « Observez attentivement comment le côté prothétique effectue la propulsion avant d'amorcer la phase oscillante, puis l'on peut constater la flexion de hanche et de genou permettant le passage du pas pour enfin préparer la prothèse à reprendre contact avec le sol. »

Partie 2 (environ 5 min) : Imagerie motrice de la propulsion au milieu de la phase oscillante

- **Objectif** : Travailler la transition de la phase pré-oscillante vers le milieu de la phase oscillante.
- **Guidance** :
 - **Visualisation** : « Imaginez la fin de la phase d'appui. Votre pied prothétique pousse fermement contre le sol, propulsant votre corps vers l'avant. Ressentez cette poussée, puis la libération du pied prothétique qui commence à s'élever du sol. »
 - "Concentrez-vous sur la flexion de la hanche et du genou qui permet à la prothèse de se déplacer sous votre corps, effectuant le passage du pas tout en maintenant l'équilibre. »
 - **Répétition** : Répétez cet exercice mental pendant 2 minutes.
 - **Pratique physique** : « Levez-vous et essayez de reproduire ces sensations dans un premier pas simulé. Concentrez-vous sur la flexion

et l'élévation de la prothèse, puis sur la préparation au prochain contact avec le sol. »

- **Répétition** : Nous répétons cet exercice une seconde fois.

Partie 3 (environ 5 min) : Imagerie motrice du milieu à la fin de la phase oscillante

- **Objectif** : Se concentrer sur la transition du milieu de la phase oscillante à la préparation du contact talon.
- **Guidance** :
 - **Visualisation** : « Imaginez que votre pied prothétique est en milieu de phase oscillante, se déplaçant sous votre corps. Votre genou est fléchi, et votre hanche commence à se préparer pour amener le pied vers l'avant. »
 - « Concentrez-vous sur la sensation de votre prothèse se préparant à toucher le sol. Ressentez la stabilité qui est nécessaire pour contrôler ce mouvement, et comment votre corps anticipe l'impact de l'attaque talon notamment en freinant l'élan de la prothèse. »
 - **Répétition** : Répétez cet exercice mental pendant 2 minutes.
 - **Pratique physique** : « Maintenant essayons en pratique, recréez ce mouvement en vous concentrant sur le contrôle de la phase oscillante et la préparation du contact talon, en veillant à l'équilibre et à la fluidité du geste. »
 - **Répétition** : Nous répétons cet exercice une seconde fois

Partie 4 (environ 5 min) : Contrôle de la qualité de l'imagerie par l'examineur et intégration de la phase complète d'oscillation

- **Objectif** : Vérifier la qualité de l'imagerie mentale et intégrer la phase oscillante complète.
- **Contrôle** :
 - **Interaction avec l'examineur** : L'examineur évalue la précision de l'imagerie motrice. Le patient décrit les sensations ressenties et les images mentales générées. L'examineur donne des retours et propose des ajustements pour améliorer la précision de l'imagerie si nécessaire.
 - Réalisation d'une cotation sur échelle de Likert de 1 à 7.
- **Guidance** :
 - **Visualisation** : « Maintenant, réunissons toutes les étapes de la phase oscillante que nous avons travaillées. Commencez par la propulsion, puis la flexion de la hanche et du genou, et enfin la préparation pour l'attaque talon. »
 - **Répétition** : Répétez cette séquence complète pendant 2 minutes.
 - **Pratique physique** : « Réalisez une courte marche pour ressentir les sensations imaginées et les intégrer à vos prochains exercices. »
 - **Répétition** : Répétons cet exercice une seconde fois.

Séance 3 : Couplage des 2 séances précédentes, phase portante puis oscillante.

Partie 1 (environ 5 min) : Imagerie motrice de la phase portante

- **Objectif** : Renforcer la maîtrise de la phase portante du cycle de marche du côté prothétique.
- **Guidance** :
 - "Imaginez le début de la phase portante. Votre talon entre en contact

avec le sol, et vous sentez progressivement le transfert de poids vers votre prothèse. Concentrez-vous sur chaque étape : la stabilité du pied prothétique, l'équilibre du corps, et la contraction des muscles nécessaires pour maintenir cette position."

- "À mesure que le transfert de poids s'effectue, ressentez l'effort de votre hanche et de vos muscles fessiers pour stabiliser et propulser votre corps. Imaginez chaque sensation, du talon à l'avant-pied, jusqu'à ce que votre corps soit prêt à entrer en phase oscillante."
- **Répétition** : Répétez cette séquence mentale pendant 2 minutes.
- **Pratique physique** : « Levez-vous et recréez ce mouvement. Concentrez-vous sur le transfert de poids et la stabilisation, puis effectuez un premier pas en ressentant ce que vous venez d'imaginer. Essayez de synchroniser les sensations réelles avec celles imaginées. »
- **Répétition supplémentaire** : Refaites cet exercice une deuxième fois pour bien intégrer la phase portante, en vous assurant que chaque détail est bien ressenti et visualisé.

Partie 2 (environ 5 min) : Imagerie motrice de la phase oscillante et contrôle

- **Objectif** : Intégrer la phase oscillante et effectuer un contrôle de la qualité de l'imagerie.
- **Guidance** :
 - « Imaginez que vous êtes à la fin de la phase portante. Votre pied prothétique commence à se lever du sol, et vous entrez dans la phase oscillante. Concentrez-vous sur la flexion de la hanche et du genou, le passage du pied sous le corps, et la préparation à poser le talon pour le

prochain pas. »

- « Ressentez lorsque la prothèse quitte le sol, et la fluidité du mouvement pendant que votre pied avance au-dessus du sol. Concentrez-vous sur la précision de chaque mouvement, en vous assurant que chaque étape de l'oscillation est bien visualisée. »
- **Répétition** : Répétez cette séquence mentale pendant 3 minutes
- **Pratique physique** : Levez-vous et réalisez réellement ce mouvement. Concentrez-vous sur les sensations ressenties
- **Répétition** : Refaites cet exercice une deuxième fois pour bien intégrer la phase oscillante.
- **Contrôle de la qualité de l'imagerie** :
 - **Interaction avec l'examineur** : L'examineur évalue la qualité de l'imagerie en posant des questions précises sur les sensations et les mouvements visualisés. Par exemple : « Quelle sensation avez-vous ressentie lors de la levée du pied prothétique ? » ou "Comment avez-vous visualisé la flexion du genou lors de la phase oscillante ? »
 - Cotation sur échelle de Likert de 1 à 7 pour évaluer la qualité d'image.
 - **Feedback et ajustements** : Basé sur les réponses du patient, l'examineur fournit des retours et propose des ajustements pour améliorer la précision de l'imagerie. Par exemple, il pourrait suggérer de se concentrer davantage sur la stabilité de l'équilibre pendant la transition ou de mieux synchroniser les sensations imaginées avec les mouvements réels.

Partie 3 (environ 10 min) : Association des 2 phases pour simuler une marche complète

- **Guidance** : « Maintenant, réunissons les phases portante et oscillante. Visualisez le cycle complet du côté prothétique, en passant en douceur de l'appui à l'oscillation, puis à l'attaque du talon pour commencer un nouveau cycle. »
- **Répétition** : Effectuez cette séquence complète pendant 3 minutes
- **Exercice physique** : « Reproduisez réellement cette séquence de marche complète. Concentrez-vous sur la fluidité entre les phases portante et oscillante, et essayez de faire correspondre vos sensations réelles avec celles imaginées. »
- **Répétition** : Refaites cet exercice une seconde fois, puis une troisième fois.
- **Contrôle** : Si le thérapeute le juge pertinent, un 2^{ème} moment de contrôle selon les mêmes modalités peut être réalisé.

8.2 Phase 2 (travail quantitatif et qualitatif du schéma de marche) : Séances 4 à 7

Séance 4 : Travail de la marche global en imagerie, accent porté sur le plan sagittal

Partie 1 (environ 5 min) : Analyse vidéo de la marche du patient lui-même, vu de côté.

- **Objectif** : Permettre au patient de prendre conscience de son propre schéma de marche, en identifiant ses qualités et ses défauts, et en développant sa capacité d'auto-correction.

- **Activité :**

- **Visionnage :** « Regardons ensemble une vidéo de votre propre marche, filmée de côté. Concentrez-vous sur chaque phase de votre cycle de marche, de l'appui à l'oscillation. Observez les mouvements de votre prothèse, votre posture, et la synchronisation de vos gestes. »
- **Auto-évaluation :** « Quelles sont vos premières impressions ? Exprimez ce que vous ressentez en observant votre marche, les aspects qui vous semblent corrects, ainsi que ceux qui nécessitent des améliorations. »

Partie 2 (environ 7 min) : Imagerie motrice de la marche en perspective externe

- **Objectif :** Développer la capacité du patient à visualiser sa marche depuis une perspective externe, comme s'il observait un autre marcheur, pour renforcer sa conscience corporelle et corriger les erreurs.
- **Guidance :**
 - **Visualisation :** « Fermez les yeux et imaginez-vous marcher, mais cette fois-ci, regardez-vous de l'extérieur, comme si vous étiez un spectateur. Observez-vous de côté, en train de marcher. Concentrez-vous sur la façon dont votre corps se déplace, sur la stabilité de votre prothèse, et sur la synchronisation entre vos jambes. »
 - **Répétition :** « Imaginez-vous marcher durant 30 secondes. Entre chaque répétition, prenez 30 secondes pour réfléchir aux ajustements que vous avez imaginés et à la manière dont ils pourraient être appliqués dans la réalité. »

Nous réalisons 3 répétitions au total, pour un total de 3 minutes.

- **Exercice physique :** « Maintenant, marchez réellement sur quelques

pas en vous concentrant sur les corrections visuelles que vous avez imaginées. Comparez votre posture et votre symétrie de pas avec celles que vous avez visualisées et les corrections que vous souhaitez potentiellement apporter. »

- **Répétition** : Nous répétons cet exercice une 2^{ème} fois

Partie 3 (environ 7 min) : Imagerie motrice de la marche en perspective interne

- **Objectif** : Renforcer la connexion entre l'esprit et le corps en permettant au patient de ressentir les mouvements internes pendant la marche, en se concentrant sur les sensations corporelles et les ajustements nécessaires pour améliorer la marche.
- **Guidance** :
 - **Visualisation interne** : « Fermez les yeux et cette fois-ci, imaginez-vous marcher de l'intérieur, comme si vous étiez réellement en train de marcher. Concentrez-vous sur les sensations dans vos jambes, votre tronc, et votre prothèse. Ressentez chaque phase de votre cycle de marche, de l'appui au transfert de poids, jusqu'à la levée de votre prothèse et son balancement vers l'avant. »
 - **Répétition** : « Imaginez-vous marcher durant 30 secondes, en ressentant chaque étape du mouvement de manière détaillée. Entre chaque répétition, prenez 30 secondes pour vous concentrer sur les ajustements internes que vous pouvez faire pour améliorer votre marche.
» Nous réalisons 3 répétitions au total, pour un total de 3 minutes.
 - **Exercice physique** : « Maintenant, levez-vous et faites quelques pas en vous concentrant sur les sensations internes que vous avez imaginées.

Comparez-les avec ce que vous ressentez réellement. Essayez de rendre les deux expériences aussi similaires que possible, en apportant les ajustements internes que vous avez imaginés. »

- **Répétition** : Nous répétons cette séquence une 2^{ème} fois.

Séance 5 : Travail de la marche global en imagerie, accent porté sur le plan frontal

Partie 1 (environ 5 min) : Analyse vidéo de la marche du patient, vue de face

- **Objectif** : Permettre au patient de prendre conscience de son propre schéma de marche, en identifiant ses qualités et ses défauts, et en développant sa capacité d'auto-correction.
- **Activité** :
 - **Visionnage** : « Regardons ensemble une vidéo de votre propre marche, filmée de face. Concentrez-vous sur chaque phase de votre cycle de marche, depuis l'appui jusqu'à l'oscillation. Observez particulièrement les mouvements de votre prothèse, votre posture, et votre équilibre. Notez comment chaque étape s'enchaîne. »
 - **Auto-évaluation** : « Exprimez ce que vous ressentez en observant votre marche. Identifiez les aspects qui vous semblent corrects, ainsi que ceux qui nécessitent des améliorations. Partagez vos observations, puis discutons des axes d'amélioration sur lesquels nous nous concentrerons lors du travail en imagerie motrice. Quid de la largeur de vos pas ? Quid de votre balancement des bras ? »

Partie 2 (environ 7 min) : Imagerie motrice de la marche en perspective externe

- **Objectif** : Développer la capacité du patient à visualiser sa marche depuis une perspective externe, comme s'il observait un autre marcheur, pour renforcer sa conscience corporelle et corriger les erreurs.
- **Guidance** :
 - **Visualisation externe** : « Fermez les yeux et imaginez-vous marcher, mais cette fois-ci, regardez-vous de l'extérieur, comme si vous étiez un spectateur. Observez-vous de face, en train de marcher. Concentrez-vous sur la façon dont votre corps se déplace, sur la stabilité de votre prothèse, et sur l'alignement de vos jambes. »
 - **Répétition** : « Imaginez-vous marcher durant 30 secondes. Entre chaque répétition, prenez 30 secondes pour réfléchir aux ajustements que vous avez imaginés et à la manière dont ils pourraient être appliqués dans la réalité. »

Nous réalisons 3 répétitions au total, pour un total de 3 minutes.

- **Exercice physique** : « Maintenant, marchez réellement sur quelques pas en vous concentrant sur les corrections visuelles que vous avez imaginées. Comparez les sensations réelles avec celles que vous avez visualisées. Essayez d'aligner les deux pour obtenir une marche plus cohérente et contrôlée. »
- **Répétition** : Nous répétons cette séquence une 2^{ème} fois selon les mêmes modalités.

Partie 2 (environ 7 min) : Imagerie motrice de la marche en perspective interne

- **Objectif** : Renforcer la conscience corporelle du patient en lui permettant de ressentir et d'ajuster ses mouvements internes durant la marche, tout en

intégrant les corrections identifiées précédemment.

- **Guidance :**

- **Visualisation interne :** « Fermez les yeux et imaginez-vous marcher, mais cette fois-ci, concentrez-vous sur les sensations internes de votre corps. Ressentez chaque contact de votre pied avec le sol, la façon dont votre poids se déplace d'un côté à l'autre, et la manière dont votre prothèse interagit avec votre jambe restante. Concentrez-vous sur les zones que nous avons identifiées comme nécessitant une correction. »
- **Répétition :** « Imaginez-vous marcher durant 30 secondes, en vous concentrant sur chaque détail des sensations internes que vous ressentez. Pensez aux ajustements que vous avez imaginés plus tôt. Entre chaque répétition, prenez 30 secondes pour vous concentrer sur ces sensations et sur les corrections internes nécessaires. »

Nous réalisons 3 répétitions au total, pour un total de 3 minutes.

- **Exercice physique :** « Maintenant, marchez sur quelques pas en portant une attention particulière aux sensations internes que vous venez de visualiser. Comparez-les avec ce que vous ressentez réellement. Travaillez à aligner vos sensations internes avec votre mouvement réel pour obtenir une marche plus fluide et équilibrée. »
- **Répétition :** Nous répétons cette séquence une 2^{ème} fois selon les mêmes modalités.

Séance 6 : Travail de la marche global, ajout d'une guidance auditive afin de travailler la symétrie de pas

Partie 1 (environ 5 min) : Imagerie motrice de la marche en perspective interne

- **Objectif** : Consolider les sensations internes du mouvement, en intégrant les corrections effectuées lors des séances précédentes.
- **Guidance** :
 - « Fermez les yeux et imaginez-vous marcher. Concentrez-vous sur les sensations internes que vous ressentez à chaque pas. Ressentez le mouvement de vos muscles, l'articulation de votre prothèse avec votre corps, et la fluidité de vos pas. Essayez d'aligner mentalement chaque sensation avec une marche stable et équilibrée. »
 - **Répétition** : 30 secondes de travail, suivis de 30 secondes de repos. Pendant le repos, prenez le temps de réfléchir à la cohérence de vos sensations internes avec vos mouvements réels. Répétez cette séquence 6 fois pour un total de 6 minutes.
- **Exercice physique** : « Effectuez quelques pas réels après cette visualisation pour comparer vos sensations internes avec votre mouvement réel. »

Partie 2 (environ 7 min) : Imagerie motrice de la marche avec métronome -

Cadence du patient

- **Objectif** : Travailler la symétrie temporelle et la longueur des pas en synchronisant la marche imaginaire avec le rythme naturel du patient.
- **Guidance** :
 - **Visualisation avec métronome** : « Fermez les yeux et imaginez-vous marcher au rythme d'un métronome réglé sur votre cadence personnelle. Concentrez-vous sur la régularité de vos pas, en recherchant la symétrie temporelle entre le côté sain et le côté amputé. Imaginez chaque pied

touchant le sol en même temps que le métronome, en maintenant une longueur de pas égale des deux côtés. »

- **Répétition : 30 secondes de travail avec le métronome, suivis de 30 secondes de travail sans le métronome.** Pendant les pauses, réfléchissez à la régularité et à la symétrie de votre marche imaginaire. Répétez cette séquence 6 fois pour un total de 6 minutes.
- **Exercice physique :** « Maintenant, levez-vous et marchez en synchronisation avec le métronome réel. Comparez la symétrie de vos pas réels avec celle que vous avez visualisée. Travaillez à ajuster votre démarche pour que les deux côtés soient aussi symétriques que possible. »

Partie 3 (environ 7 min) : Imagerie motrice de la marche avec métronome - Cadence standard

- **Objectif :** Amener le patient à synchroniser sa marche avec une cadence de référence correspondant à celle d'une personne valide du même âge et sexe, pour améliorer l'efficacité et la régularité de sa marche (référentiel du matériel de marche Zeno).
- **Guidance :**
 - **Visualisation avec métronome :** « Fermez les yeux et imaginez-vous marcher au rythme d'un métronome réglé sur la cadence moyenne d'une personne valide de votre âge et sexe. Concentrez-vous sur le maintien d'une symétrie parfaite dans la durée et la longueur de vos pas. Imaginez chaque pied touchant le sol en harmonie avec le métronome, en gardant un équilibre parfait entre les deux côtés. »

- **Répétition** : 30 secondes de travail avec le métronome, suivis de 30 secondes sans le métronome.

Répétez cette séquence 6 fois pour un total de 6 minutes.

- **Exercice physique** : « Maintenant, si vous le pouvez, marchez en suivant le métronome réglé sur cette cadence standard. Comparez votre capacité à maintenir la symétrie de vos pas à cette vitesse. Travaillez à ajuster votre marche pour qu'elle soit aussi régulière que possible. »

Séance 7 : Travail de la marche global, ajout d'une guidance auditive afin de travailler la symétrie de pas

Partie 1 (environ 5 min) : Imagerie motrice de la marche en perspective interne

- **Objectif** : Consolider les sensations internes du mouvement, en intégrant les corrections effectuées lors des séances précédentes.
- **Guidance** :
 - **Visualisation interne** : « Fermez les yeux et imaginez-vous marcher. Concentrez-vous sur les sensations internes que vous ressentez à chaque pas. Ressentez le mouvement de vos muscles, l'articulation de votre prothèse avec votre corps, et la fluidité de vos pas. Essayez d'aligner mentalement chaque sensation avec une marche stable et équilibrée. »
 - **Répétition** : 30 secondes de travail, suivis de 30 secondes de repos. Pendant le repos, prenez le temps de réfléchir à la cohérence de vos sensations internes avec vos mouvements réels. Répétez cette

séquence 6 fois pour un total de 6 minutes.

- **Exercice physique** : « Effectuez quelques pas réels après cette visualisation pour comparer vos sensations internes avec votre mouvement réel. »

Partie 2 (environ 7 min) : Imagerie motrice de la marche avec métronome - Cadence du patient

- **Objectif** : Travailler la symétrie temporelle et la longueur des pas en synchronisant la marche imaginaire avec le rythme naturel du patient.
- **Guidance** :
 - **Visualisation avec métronome** : « Fermez les yeux et imaginez-vous marcher au rythme d'un métronome réglé sur votre cadence personnelle. Concentrez-vous sur la régularité de vos pas, en recherchant la symétrie temporelle entre le côté sain et le côté amputé. Imaginez chaque pied touchant le sol en même temps que le métronome, en maintenant une longueur de pas égale des deux côtés. »
 - **Répétition** : 30 secondes de travail, suivis de 30 secondes de repos. Pendant les pauses, réfléchissez à la régularité et à la symétrie de votre marche imaginaire. Répétez cette séquence 6 fois pour un total de 6 minutes.
 - **Variante** : Lors des 3 dernières répétitions, le métronome est activé durant 15 secondes seulement, puis le patient doit poursuivre selon le même rythme malgré son arrêt.
 - **Exercice physique** : « Maintenant, levez-vous et marchez en synchronisation avec le métronome réel. Comparez la symétrie de vos pas réels avec celle que vous avez visualisée. Travaillez à ajuster votre

démarche pour que les deux côtés soient aussi symétriques que possible. »

Partie 3 (environ 7 min) : Imagerie motrice de la marche avec métronome - Cadence standard

- **Objectif** : Amener le patient à synchroniser sa marche avec une cadence de référence correspondant à celle d'une personne valide du même âge et sexe, pour améliorer l'efficacité et la régularité de sa marche (référentiel du matériel de marche Zeno).
- **Guidance** :
 - **Visualisation avec métronome** : « Fermez les yeux et imaginez-vous marcher au rythme d'un métronome réglé sur la cadence moyenne d'une personne valide de votre âge et sexe. Concentrez-vous sur le maintien d'une symétrie parfaite dans la durée et la longueur de vos pas. Imaginez chaque pied touchant le sol en harmonie avec le métronome, en gardant un équilibre parfait entre les deux côtés. »
 - **Répétition** : 30 secondes de travail, suivies de 30 secondes de repos. Pendant les pauses, évaluez mentalement la symétrie et la régularité de votre marche par rapport à cette cadence standard.

Répétez cette séquence 6 fois pour un total de 6 minutes.

- **Variante** : Lors des 3 dernières répétitions, le métronome est activé durant 15 secondes seulement, puis le patient doit poursuivre selon le même rythme malgré son arrêt.
- **Exercice physique** : « Maintenant, si vous le pouvez, marchez en suivant le métronome réglé sur cette cadence standard. Comparez votre

capacité à maintenir la symétrie de vos pas à cette vitesse. Travaillez à ajuster votre marche pour qu'elle soit aussi régulière que possible. »

8.3 Phase 3 (Travail des transferts) : Séances 8 et 9

Séance 8 : Travail du transfert assis-debout et allongé-assis.

Partie 1 (environ 7 min) : Transfert assis-debout depuis une chaise

- **Objectif** : Développer la capacité du patient à effectuer un transfert fluide et stable de la position assise à la position debout.
- **Guidance** :
 - **Visualisation interne** : « Fermez les yeux et imaginez-vous assis sur une chaise. Ressentez le poids de votre corps réparti sur vos hanches et vos cuisses. Maintenant, imaginez-vous vous pencher légèrement en avant, ressentant la tension dans vos cuisses et l'engagement de vos muscles abdominaux. Visualisez le mouvement de vos mains qui poussent légèrement sur les accoudoirs ou sur vos genoux pour vous aider à vous lever. Concentrez-vous sur la coordination entre vos jambes, votre prothèse, et vos bras pour vous élever en douceur et en équilibre. Ressentez la contraction des quadriceps lorsque vous poussez sur vos jambes. Une fois debout, réitérez l'expérience en recommençant la situation étant déjà assis. »
 - **Répétition** : 40 secondes de travail, suivis de 20 secondes de repos.

Pendant le repos, prenez le temps de réfléchir aux sensations que vous avez imaginées et comment elles se comparent à votre expérience réelle. Répétez cette séquence 6 fois pour un total de 6 minutes.

- **Exercice physique** : « Après ces visualisations, vous pouvez effectuer un transfert réel assis-debout en vous concentrant sur les sensations que vous avez imaginées. Comparez la fluidité et la stabilité de votre mouvement réel avec celles que vous avez visualisées. »

Partie 2 (environ 7 min) : Transfert debout-assis sur une chaise

- **Objectif** : Travailler la capacité à s'asseoir avec contrôle, en maintenant l'équilibre et en contrôlant la descente.
- **Guidance** :
 - **Visualisation interne** : « Fermez les yeux et imaginez-vous debout face à une chaise. Commencez par sentir la tension dans vos jambes, prête à supporter le poids de votre corps pendant la descente. Visualisez-vous en train de plier doucement les genoux, en gardant votre dos droit et votre poids bien centré. Concentrez-vous sur la sensation de contrôle que vous ressentez en abaissant lentement votre corps vers la chaise. Imaginez la sensation du contact de vos fessiers avec la chaise, tout en gardant votre équilibre stable. Une fois assis, réitérez l'expérience en recommençant la situation étant déjà debout. »
 - **Répétition** : 40 secondes de travail, suivis de 20 secondes de repos. Pendant les pauses, évaluez mentalement la fluidité de votre descente et la précision de votre placement sur la chaise. Répétez cette séquence 6 fois pour un total de 6 minutes.

- **Exercice physique** : « Asseyez-vous réellement en vous concentrant sur la qualité du mouvement. Comparez la sensation réelle avec ce que vous avez imaginé et ajustez votre technique pour une meilleure stabilité et contrôle. »

Partie 3 (environ 7 min) : Transfert assis-debout suivi d'une courte marche

- **Objectif** : Effectuer une séquence plus fonctionnelle, en ajoutant une courte marche sur 6 pas afin d'associer ce travail avec les séances précédentes.
- **Guidance** :
 - **Visualisation interne** : « Fermez les yeux et imaginez-vous assis sur votre chaise. Visualisez-vous vous lever avec un bon ancrage de vos pieds au sol, ressentant la contraction des quadriceps lors de la propulsion vers l'avant, une fois en position debout, vous recherchez la stabilité et initiez la marche comptant 6 pas. La longueur de chaque pas est symétrique, tentez de ressentir les chocs lors de chaque attaque talon, et l'effort de poussée à la fin de chaque pas pour la propulsion vers l'avant. »
 - **Répétition** : Répétez mentalement cet exercice durant 3 minutes.
 - **Exercice physique** : « Levez-vous et effectuez cette séquence complète (assis-debout, marche sur 6 pas). »
 - **Répétition** : Nous répétons cela une deuxième fois pour terminer la séance.

Le thérapeute peut, s'il le juge nécessaire, ajouter des moments de contrôle de qualité et reste à disposition du patient si besoin.

Séance 9 : Travail du transfert assis-debout et de la marche

Partie 1 (environ 10 min) : Enchaînement des transferts assis-debout et debout-assis

- **Objectif** : Améliorer la fluidité et la coordination des transferts entre la position assise et la position debout, en répétant l'enchaînement des mouvements pour renforcer la mémoire musculaire et la confiance du patient.
- **Guidance** :
 - **Visualisation interne** : « Fermez les yeux et imaginez-vous assis sur une chaise. Visualisez-vous vous lever en douceur, en vous concentrant sur la poussée des jambes, le transfert de poids vers vos pieds, et l'engagement de vos muscles fessiers et abdominaux pour vous stabiliser. Une fois debout, imaginez-vous vous asseoir à nouveau, en contrôlant la descente, en gardant votre dos droit et vos pieds bien ancrés au sol. Une fois assis, répétez l'expérience jusqu'à la fin du temps imparti. »
 - **Répétition** : Travail de 40 secondes, suivi de 20 secondes de repos. Pendant les pauses, prenez le temps de réfléchir à la fluidité de l'enchaînement entre les deux mouvements et aux sensations ressenties dans vos muscles et articulations. Répétez cette séquence 10 fois pour un total de 10 minutes.
- **Exercice physique** :
 - « Après la phase d'imagerie, réalisez un ou deux enchaînements assis-

debout et debout-assis. Concentrez-vous sur la coordination et la fluidité de vos mouvements, en comparant vos sensations réelles avec celles que vous avez visualisées. »

Partie 2 (environ 10 min) : Transfert assis-debout, marche sur 6 pas, demi-tour, transfert debout-assis.

- **Objectif** : Renforcer la capacité du patient à effectuer une séquence complète de mouvements fonctionnels, combinant le transfert assis-debout, la marche, le demi-tour, et le retour en position assise, en simulant le test du Timed Up & Go.
- **Guidance** :
 - **Visualisation interne** : « Fermez les yeux et imaginez-vous assis sur une chaise. Visualisez-vous vous lever, puis marcher 6 pas en ligne droite. Concentrez-vous sur la stabilité de votre marche, la symétrie de vos pas, et la sensation de votre prothèse s'intégrant harmonieusement dans le mouvement. Imaginez-vous effectuer un demi-tour contrôlé après les 6 pas, puis revenir vers la chaise et vous asseoir en douceur. »
 - **Répétition** : Travail de 40 secondes, suivi de 20 secondes de repos. Pendant les pauses, réfléchissez à la précision et à la coordination de votre séquence de mouvements. Répétez cette séquence jusqu'à ce que je vous dise de faire une pause.
- **Pratique physique (à la mi-séance et à la fin)** :
 - **Au milieu (vers 15'30'')** : « Levez-vous et effectuez cette séquence complète (assis-debout, marche sur 6 pas, demi-tour, debout-assis) une fois. Concentrez-vous sur la comparaison entre mouvement réel et

imaginer, afin de vous aider à mieux visualiser durant le prochain temps d'imagerie. »

- **À la fin (vers 20'00'')** : « Réalisez de nouveau cette séquence complète, en essayant d'améliorer votre fluidité et votre contrôle. Comparez vos sensations réelles avec celles que vous avez visualisées. »

Le thérapeute peut, s'il le juge nécessaire, ajouter des moments de contrôle de qualité et reste à disposition du patient si besoin.

8.4 Phase 4 (Travail des activités supérieures de la marche et mises en situation de la vie quotidienne) : Séances 10 à 12

Séance 10 : Travail de la marche et des escaliers

Partie 1 (environ 6 min) : Imagerie motrice de la marche simple

- **Objectif** : Renforcer la fluidité et la stabilité de la marche en intégrant les corrections travaillées lors des séances précédentes.
- **Guidance** :
 - **Visualisation interne** : « Fermez les yeux et imaginez-vous marcher sur un sol plat et régulier. Concentrez-vous sur chaque pas, en ressentant le contact avec le sol, la stabilité de votre prothèse, et l'équilibre de votre corps. Maintenez une marche fluide et régulière, en intégrant toutes les corrections de posture et de rythme travaillées précédemment. »
 - **Répétition** : « Nous réalisons cet exercice mental durant 6 minutes complètes. »

Si le patient ressent des difficultés à maintenir la concentration ou si la qualité de

l'imagerie diminue, il peut faire une courte pause. Après chaque pause, il est encouragé à reprendre la visualisation avec une attention renouvelée sur la qualité des sensations imaginées. Le métronome peut être utilisé sur de courts laps de temps afin de dicter la cadence pour obtenir une symétrie de pas.

- **Contrôle de la qualité** : À 3 minutes, le thérapeute interviendra pour vérifier la qualité de l'imagerie. Le patient est invité à verbaliser ses sensations et à ajuster la visualisation si nécessaire.

Partie 2 (environ 7 min) : Imagerie motrice de la montée d'escalier

- **Objectif** : Préparer le patient à monter un escalier en toute sécurité, en mettant l'accent sur l'équilibre, la coordination et la régularité des mouvements.
- **Guidance** :
 - **Visualisation interne** : « Fermez les yeux et imaginez-vous devant un escalier avec dix marches. Concentrez-vous sur chaque mouvement : l'élévation de votre jambe, le placement précis de votre pied sur chaque marche, et la force que vous appliquez pour vous élever. Ressentez la stabilité de votre prothèse et la coordination entre vos deux jambes à chaque pas. Posez d'abord le pied sain puis amenez le pied prothétique. »
 - **Répétition** : Imaginez-vous monter cet escalier de manière fluide, en vous arrêtant brièvement après chaque série de 10 marches pour évaluer mentalement votre performance. Prenez une pause de 20 secondes après chaque série, en utilisant ce temps pour visualiser les corrections et ajustements nécessaires.

- **Exercice physique (facultatif)** : Si le patient se sent prêt, il peut effectuer physiquement quelques marches en utilisant les corrections visualisées.

Partie 3 (environ 7 min) : Imagerie motrice de la descente d'escalier

- **Objectif** : Préparer le patient à descendre un escalier en toute sécurité, en mettant l'accent sur le contrôle de la descente, la sécurité, et la fluidité des mouvements.
- **Guidance** :
 - **Visualisation interne** : « Fermez les yeux et imaginez-vous au sommet d'un escalier. Visualisez chaque mouvement alors que vous commencez à descendre : la stabilité de votre jambe qui reste en contact avec la marche supérieure, la précision avec laquelle vous placez votre pied prothétique sur la marche suivante, et le contrôle de votre équilibre tout au long de la descente. Posez d'abord le pied prothétique puis ramenez le pied sain. »
 - **Répétition** : Comme pour la montée, imaginez-vous descendre les 10 marches en toute sécurité, avec une pause de 20 secondes après chaque série pour ajuster mentalement votre technique. Répétez cela jusqu'à la fin du temps imparti.
 - **Exercice physique (facultatif)** : Le patient peut également pratiquer la descente d'une série de marches en appliquant les corrections visualisées pour renforcer la connexion entre l'imagerie mentale et la performance physique.

Le thérapeute peut, s'il le juge nécessaire, ajouter des moments de contrôle de qualité et reste à disposition du patient si besoin.

Séance 11 : Travail de la marche lors de mises en situation de la vie quotidienne

Partie 1 (environ 6 min) : Imagerie motrice de la marche simple

- **Objectif** : Renforcer la fluidité et la stabilité de la marche en intégrant les corrections travaillées lors des séances précédentes.
- **Guidance** :
 - **Visualisation interne** : « Fermez les yeux et imaginez-vous marcher sur un sol plat et régulier. Concentrez-vous sur chaque pas, en ressentant le contact avec le sol, la stabilité de votre prothèse, et l'équilibre de votre corps. Maintenez une marche fluide et régulière, en intégrant toutes les corrections de posture et de rythme travaillées précédemment. »
 - **Répétition** : « Nous réalisons cet exercice mental durant 6 minutes complètes. »

Si le patient ressent des difficultés à maintenir la concentration ou si la qualité de l'imagerie diminue, il peut faire une courte pause. Après chaque pause, il est encouragé à reprendre la visualisation avec une attention renouvelée sur la qualité des sensations imaginées.

- **Contrôle de la qualité** : À 3 minutes, le thérapeute interviendra pour vérifier la qualité de l'imagerie. Le patient est invité à verbaliser ses sensations et à ajuster la visualisation si nécessaire.

Partie 2 (environ 7 min) : Imagerie motrice d'un transfert fonctionnel – Se lever

pour ouvrir une porte

- **Objectif** : Préparer le patient à effectuer un transfert fonctionnel complexe, impliquant se lever, marcher, ouvrir une porte battante, et retourner à sa position initiale.
- **Guidance** :
 - **Visualisation du transfert** : « Fermez les yeux et imaginez-vous assis dans une chaise chez vous. Vous entendez quelqu'un sonner à la porte. Concentrez-vous sur chaque étape du mouvement : sentez-vous vous appuyer sur les accoudoirs ou sur vos jambes pour vous lever, ressentez l'équilibre que vous trouvez en vous tenant debout, et imaginez vos premiers pas vers la porte. Visualisez-vous en train de saisir la poignée de la porte, en ressentant la résistance du battant alors que vous tirez pour l'ouvrir vers l'intérieur. Enfin, imaginez-vous en train de faire demi-tour pour retourner à votre place et vous rasseoir. »
 - **Répétition** : Répétez cette séquence durant 3 minutes.
 - **Exercice physique** : Le patient peut effectuer physiquement le transfert (se lever, marcher, ouvrir la porte et retourner s'asseoir) pour comparer ses sensations réelles avec l'imagerie mentale.
 - **Répétition** : On répète de nouveau la séquence durant 3 minutes, suivi d'un nouveau essai réel.

Partie 3 (environ 7 min) : Imagerie motrice de la marche avec obstacles

- **Objectif** : Préparer le patient à gérer des obstacles lors de la marche, en améliorant sa capacité à s'adapter à des situations imprévues et à maintenir son équilibre.

- **Guidance :**
 - **Visualisation des obstacles :** « Fermez les yeux et imaginez-vous marcher sur un chemin qui comporte deux obstacles successifs. Le premier obstacle est bas, une petite marche que vous devez franchir en levant légèrement votre pied au-dessus. Concentrez-vous sur la sensation de lever votre prothèse en douceur et de la poser de l'autre côté de l'obstacle. Puis, immédiatement après, vous rencontrez un deuxième obstacle que vous devez contourner. Visualisez-vous en train de dévier légèrement de votre trajectoire pour le contourner, tout en maintenant votre équilibre. »
 - **Répétition :** Répétez cette séquence durant 3 minutes.
 - **Exercice physique :** « Levez-vous, nous réalisons en situation réelle cette exercice, concentrez-vous sur la précision et la sécurité de chaque pas. »
 - Le thérapeute aura placé 2 obstacles dans la salle.
 - **Répétition :** On répète de nouveau la séquence durant 3 minutes, suivi d'un nouveau essai réel.

Le thérapeute peut, s'il le juge nécessaire, ajouter des moments de contrôle de qualité et reste à disposition du patient si besoin.

Séance 12 : Travail de la marche lors de mise en situation de la vie quotidienne

Partie 1 (environ 6 min) : Imagerie motrice de la marche simple

- **Objectif :** Renforcer la fluidité et la stabilité de la marche en intégrant les

corrections travaillées lors des séances précédentes.

- **Guidance :**

- **Visualisation interne :** « Fermez les yeux et imaginez-vous marcher sur un sol plat et régulier. Concentrez-vous sur chaque pas, en ressentant le contact avec le sol, la stabilité de votre prothèse, et l'équilibre de votre corps. Maintenez une marche fluide et régulière, en intégrant toutes les corrections de posture et de rythme travaillées précédemment. »
- **Contrôle de la qualité :** À 3 minutes, le thérapeute interviendra pour vérifier la qualité de l'imagerie. Le patient est invité à verbaliser ses sensations et à ajuster la visualisation si nécessaire.
- **Répétition :** Si le patient ressent des difficultés à maintenir la concentration ou si la qualité de l'imagerie diminue, il peut faire une courte pause. Après chaque pause, il est encouragé à reprendre la visualisation avec une attention renouvelée sur la qualité des sensations imaginées.

Partie 2 (environ 7 min) : Imagerie motrice de la marche avec un verre d'eau (double tâche)

- **Objectif :** Entraîner la coordination et la concentration nécessaires pour marcher tout en tenant un objet fragile, simulant une double tâche.
- **Guidance :**
 - **Visualisation avec double tâche :** « Fermez les yeux et imaginez-vous tenant un verre d'eau dans une main tout en marchant. Concentrez-vous sur le fait de maintenir le verre stable pour éviter de renverser l'eau, tout en gardant une démarche régulière et équilibrée sur une distance de 10

pas. Ressentez l'équilibre que vous devez maintenir entre vos mouvements de marche et la stabilité de votre main. »

- **Répétition** : Répétez cette séquence durant 3 minutes
- **Exercice physique** : « Maintenant, si possible, levez-vous et marchez réellement en tenant un objet similaire dans votre main, en vous concentrant sur la stabilité et la coordination des mouvements, comme vous l'avez imaginé. »
- **Répétition** : On répète de nouveau la séquence durant 3 minutes, suivi d'un nouveau essai réel.

Partie 3 (environ 7 min) : Imagerie motrice du passage d'une porte et d'un seuil

- **Objectif** : Préparer le patient à sortir d'une pièce en franchissant un seuil, en travaillant la coordination et la conscience corporelle.
- **Guidance** :
 - **Visualisation du passage d'une porte** : « Fermez les yeux et imaginez-vous en train de vous lever pour sortir d'une pièce. Approchez-vous de la porte, ouvrez-la, et concentrez-vous sur le fait de franchir le seuil. Sentez le léger changement de niveau sous vos pieds, ajustez votre équilibre, et poursuivez votre marche à l'extérieur de la pièce. Visualisez chaque étape avec précision, de l'ouverture de la porte à la fermeture derrière vous. »
 - **Répétition** : Répétez cette séquence durant 3 minutes.
 - **Exercice physique** : « Si possible, réalisez cet exercice dans la réalité. Levez-vous, marchez jusqu'à la porte, ouvrez-la, et franchissez le seuil en concentrant votre attention sur les sensations et les ajustements

nécessaires pour maintenir votre équilibre et fluidité. Comparez ces sensations avec celles que vous avez imaginées. »

- **Répétition** : On répète de nouveau la séquence durant 3 minutes, suivi d'un nouveau essai réel.

Le thérapeute peut, s'il le juge nécessaire, ajouter des moments de contrôle de qualité et reste à disposition du patient si besoin.

9 Protocole de relaxation : Méthode Jacobson

Cette méthode de relaxation a été mise inventée au début du XXème siècle par le médecin psychiatre Edmund Jacobson. Elle repose sur le principe de l'influence du contrôle somatique sur la réponse psychique, le relâchement musculaire aboutissant à la détente mentale. Un état d'anxiété se retranscrit par un état de tension musculaire que l'on cherche à diminuer.

Les séances de relaxation peuvent faire partie d'un protocole de rééducation [101] et ne sont pas dénuées de sens dans le cadre de notre étude. Selon Benson et al [102], les modifications corporelles se déroulent en 3 étapes : diminution de l'activité physique et de la tension psychique, diminution de stimulation du système nerveux périphérique avec passage privilégié de l'action du système parasympathique, ayant pour conséquence une diminution de la tension musculaire, une vasodilatation avec diminution de la pression artérielle, diminution de la fréquence cardiaque et du rythme

respiratoire.

Ces modifications seraient responsable des bienfaits de la relaxation.

Benson rapporte aussi 4 conditions à réunir :

- Endroit propice c'est-à-dire calme, avec une lumière tamisée
- Réalisation dans une position confortable, assis ou allongé
- Utilisation d'un « mental device » traduit par « outil mental », on demande au sujet de porter son attention sur un point neutre, qui se retrouve ici être la détente progressive des groupes musculaires.
- Attitude passive : il s'agit de la concentration passive, c'est-à-dire se concentrer sans faire d'effort.

Les séances de relaxation seront réalisées durant 20 minutes, au rythme de 3 séances par semaine également.

La technique de Jacobson s'effectuant en 4 phases, il sera donc réalisé 1 phase par semaine durant 4 semaines.

Le protocole complet, repris des travaux de Chaloult, Goulet et Ngô [103], médecins psychiatres à Montréal est disponible en annexe 6.

Discussion

L'amputation de membre inférieur représente une épreuve majeure pour les patients, tant sur le plan physique que psychologique. Le niveau trans-tibiale a la 2^{ème} incidence d'AMMI juste derrière le niveau trans-fémoral [3], et l'étiologie vasculaire arrive largement en tête avec plus de 80% de causes [2]. Son impact se traduit par une diminution de la mobilité, de l'autonomie et donc de la qualité de vie [11]. Cette population présente une fatigabilité importante de par les comorbidités souvent associées [7], rendant la rééducation physique parfois difficile.

Dans ce contexte, l'imagerie motrice apparaît comme une nouvelle technique de rééducation prometteuse, de plus en plus étudiée depuis le début des années 90. D'abord de part des études neurophysiologiques démontrant la similarité des aires corticales activées lors de l'IM en comparaison à la pratique physique [42] pour des mouvements simples [104] et complexes comme la marche [43] ; puis son impact sur la plasticité cérébrale [60,105].

Le développement et l'utilisation de cette technique rééducative s'accroissent et montrent de plus en plus de résultats positifs dans diverses pathologies notamment neurologiques comme l'hémiplégie post AVC [77], la maladie de Parkinson [106] ou encore la sclérose en plaque [107].

En ce qui concerne la rééducation à la marche des amputés de membre inférieur, nous n'avons retrouvé que quatre études [78–81] portant sur l'utilisation de l'imagerie motrice (IM) pour améliorer ces capacités. En effet, les autres études retrouvées portaient principalement sur la faisabilité de l'IM dans cette population [62,108,109] qui

est dorénavant démontrée.

Bien que limitées en nombre, ces études présentent des résultats encourageants, suggérant un potentiel prometteur de l'IM dans ce domaine de la rééducation. Ces éléments ont motivé l'élaboration de notre protocole.

1 Justification des choix méthodologiques

1.1 Phase d'imagerie motrice en période pré prothétique ?

Il était initialement prévu de réaliser une phase d'IM supplémentaire durant la phase pré-prothétique que nous avons finalement retiré. En effet cela aurait pu induire plusieurs types de biais dont les 2 principaux sont :

- Biais de mesure : Si les participants reçoivent l'intervention par IM avant les tests initiaux, cela pourrait influencer les résultats des premières mesures. Par exemple, l'entraînement mental, même s'il ne concerne pas directement la marche, pourrait améliorer la performance lors des tests pré-intervention, faussant ainsi la comparaison avec les groupes qui n'ont pas reçu l'IM. Les tests pré-intervention ne seraient alors plus de vrais "pré-tests", car les sujets auraient déjà bénéficié d'une forme d'entraînement.
- Biais d'entraînement : L'IM, même non spécifique à la marche, peut amener les participants à mieux performer sur des tâches spécifiques lors des tests initiaux, créant un effet d'entraînement. Cela fausserait les résultats en donnant l'illusion que les participants sont naturellement plus performants, alors qu'ils ont en réalité bénéficié de la préparation mentale préalable.

Dans un contexte de manque de données retrouvé dans la littérature, nous souhaitons créer une étude montrant ou non un intérêt de l'IM dans la population cible. Avoir des populations similaires dans le groupe expérimental et contrôle à T1, que ce soit sur le plan démographique ou clinique, est important selon nous afin de chercher une amélioration en fin de prise en charge.

Si une amélioration des performances de marche est prouvée à terme par l'intermédiaire de cette étude, il reste intéressant de réaliser de nouvelles recherches sur la pratique et l'intérêt de l'IM durant la phase pré-prothétique.

Nous savons que la vivacité ainsi que l'isochronie s'altèrent relativement rapidement après la perte d'un membre ou l'immobilisation de ce dernier, rappelons que les tests évaluant ces 2 paramètres sont déjà en deçà d'une population saine chez les individus ayant eu une immobilisation entre 2 et 4 semaines [62]. Fort heureusement il a été montré que cela restait entraînable et améliorable [62,108]. Cela porte à croire que, plus tôt le patient débute l'entraînement par IM, moins il aura de difficultés pour la réaliser, et meilleures seront sa qualité d'image ainsi que sa congruence temporelle qui par ailleurs influencent grandement son effet d'apprentissage.

Sacuro et al. [81] ont mis en évidence une amélioration des tests de marche de 10m et du TUG lors des tests initiaux à la suite de l'entraînement IM en phase pré-prothétique, malheureusement il existait un effet groupe potentiellement en rapport avec une différence d'âge significative en faveur du groupe expérimental. Ces résultats sont tout de même encourageants et portent à croire que l'IM en phase pré prothétique

a participé, dans une certaine mesure, à cette amélioration.

Dans cette étude, nous souhaitons évaluer l'impact d'une imagerie mentale et motrice exclusivement axée sur le travail de rééducation de la marche. Nous avons pensé à un programme d'IM spécifique à cette phase pré-prothétique incluant plusieurs axes :

- Reconnaissance de latéralité, en effet il est évoqué une simulation motrice interne de ses propres segments de membre, en les imaginant tourner pour adopter la position représentée, pouvant alors entrer dans une phase d'initiation à l'IM [63].
- Exercices de schéma corporel : proposés pour aider les patients à mieux intégrer et comprendre la représentation, la localisation et l'orientation de leurs membres dans l'espace, notamment le membre résiduel et fantôme. En effet chez l'amputé ce schéma corporel se retrouve altéré [110].
- Imagerie de contractilité du moignon : Les patients utiliseraient des techniques d'imagerie motrice pour visualiser la contraction du moignon. Cette approche vise à améliorer la capacité des patients à contrôler mentalement les muscles du moignon, dont la contraction est importante pour obtenir une bonne globulisation.
- Imagerie de renforcement musculaire : par l'intermédiaire d'exercices mentaux de flexion/extension de hanche ou genou, abduction/adduction de hanche, sans et avec poids. Ces exercices sont conçus pour potentiellement améliorer la force musculaire du membre résiduel et donc limiter l'atrophie [17].
- Imagerie de marche entre les barres parallèles, utilisée par *Saruco et al.* [81] dans leur phase pré-prothétique, où le patient imagine sa marche unipodale associée à des flexions/extensions de hanche et genou afin de simuler la

marche avec prothèse.

Il est intéressant de noter que le travail de la marche n'est pas prépondérant dans ce que nous proposons en phase pré-prothétique. Il est pourtant possible d'imaginer la réalisation d'une séquence motrice complexe même si elle n'est pas réalisable physiquement, principalement en rapport avec la mémoire de ces mouvements, mais les patients amputés ne récupéreront pas leur fonction locomotrice normale. Comme l'explique Saruco et al. [81] « La récupération fonctionnelle et la restauration des capacités locomotrices dépendront de l'intégration d'une prothèse. Il est donc primordial que l'imagerie de la marche intègre l'utilisation de ce dispositif prothétique individualisé avant d'envisager son utilisation affinée. ».

1.2 Randomisation

Dans notre étude, nous avons utilisé un schéma de randomisation 1:1 pour répartir de manière égale et aléatoire les participants entre les deux groupes (IM et relaxation). Bien que cette méthode réduise les biais de sélection, elle ne garantit pas que les groupes seront parfaitement comparables sur toutes les caractéristiques initiales, comme l'âge ou les comorbidités. La randomisation assure toutefois une répartition aléatoire des facteurs connus et inconnus, minimisant ainsi les risques de biais et renforçant la validité interne de l'étude.

1.3 Justification des analyses en sous-groupe

Certaines variables pourraient interagir de manière significative avec les résultats de

l'étude et devront être prises en compte pour éviter tout biais dans l'interprétation des résultats.

Les analyses en sous-groupes sont réalisées pour identifier si les effets d'une intervention varient en fonction de certaines caractéristiques des participants.

Niveau d'activité physique antérieur : choix de l'IPAQ-SF (International Physical Activity Questionnaire – Short Form) :

Aucune échelle spécifique n'a été identifiée pour évaluer le niveau d'activité physique des patients amputés en préopératoire. Pour autant, la connaissance de cette information s'avère intéressante pour l'analyse des résultats. En effet, d'une part, le niveau d'expertise physique influence la capacité d'imagerie motrice (Chang et al.), et d'autre part, il aura un impact direct sur les capacités de marche lors de la rééducation postopératoire.

Nous avons opté pour l'IPAQ-SF, version abrégée de l'IPAQ, un questionnaire de 7 questions, rapide à compléter. Bien que sa validité et sa fiabilité pour mesurer précisément l'activité physique soient parfois jugées modestes (Lee et al., 2011), il est couramment utilisé dans la littérature et constitue un outil pratique. Aucun autre outil n'a été identifié avec une fiabilité nettement supérieure, y compris l'ONAS-PAS et le GPAQ (Charles et al.), qui sont par ailleurs plus complexes à utiliser. L'IPAQ-SF permet de classer les individus en trois catégories d'activité physique : faible, modéré et élevé.

En résumé, l'IPAQ-SF, malgré ses limites, reste l'outil le plus pratique et validé pour évaluer rapidement l'activité physique des patients amputés, en l'absence d'une échelle plus fiable et spécifique.

Ce questionnaire se trouve en annexe 7.

Ce questionnaire porte normalement sur les 7 derniers jours précédant sa réalisation, nous avons modifié ce paramètre afin de le remplacer par « les 7 jours précédant la chirurgie ».

Type de pied prothétique :

Il est important de différencier les résultats entre des patients équipés d'un pied prothétique de classe SACH et ceux dotés d'un pied à restitution d'énergie de classe 3, plus dynamique, afin de ne pas attribuer à l'imagerie motrice des améliorations liées à une technologie prothétique différente. Bien que nous réalisons une randomisation, l'effectif total reste relativement faible et par conséquent il pourrait exister une différence significative concernant les types de pied entre le groupe expérimental et contrôle.

Afin de nous affranchir de cela, nous réaliserons 5 catégories pour cette analyse en sous-groupe :

- Pied SACH
- Pied articulé
- Pied à restitution d'énergie classe 1
- Pied à restitution d'énergie classe 2
- Pied à restitution d'énergie classe 3

Cette approche renforcera la validité de nos conclusions en minimisant l'influence des biais liés à la répartition des types de pieds, malgré la taille réduite de l'échantillon et la possible hétérogénéité entre les groupes.

1.4 Choix de la relaxation comme tâche témoin

Le groupe témoin a bénéficié de séances supplémentaires afin de compenser celles d'imagerie motrice réalisées par le groupe expérimental, évitant ainsi tout biais de performance lié à l'absence de « séance contrôle ».

La relaxation de type Jacobson a été choisie car elle est une activité visant principalement à la détente, sans impliquer d'imagerie mentale spécifique ou de stimulation cognitive liée à la rééducation motrice. Cette technique se concentre sur la contraction et le relâchement progressif des muscles [101,103], est une technique utilisée pour diminuer le stress et la tension musculaire, sans avoir d'impact direct sur la plasticité cérébrale ou la fonction motrice.

Cela permet donc de bien isoler les effets de l'IM et d'éviter toute contamination des résultats entre les groupes.

1.5 Choix du bilan cognitif et des tests de faisabilité

Le MMSE (Mini-Mental State Examination) est réalisé dans l'ensemble des études portant sur l'IM. En effet, il s'agit d'une technique purement cognitive, ces fonctions doivent être préservées afin de pouvoir l'utiliser.

Les tests sélectionnés dans notre étude s'appuient sur les recommandations de Malouin et Richards [54], qui soulignent l'importance d'associer des questionnaires d'évaluation de la qualité et de la vivacité des images mentales (comme le MIQ-RS dans notre cas, ou le KVIQ, le deuxième plus utilisé) à des mesures de chronométrie mentale, constituant ainsi la méthode la plus fiable pour évaluer l'imagerie motrice.

Saruco et al. [81] ont utilisé le KVIQ dans leur étude, en associant une évaluation de la congruence temporelle avec un test de cinq abductions de hanche réalisées en

imagerie et en pratique réelle. De leur côté, Cunha et al. [78], ainsi que Vanmairis [79], ont exclusivement employé le MIQ-RS. Enfin, Matalon et al. [80] ne mentionnent pas l'utilisation de tests de faisabilité dans leur étude.

2 Justification des critères d'évaluation

2.1 Choix du test de marche de 2 minutes

Notre choix s'est porté sur l'utilisation du TM2 comme critère de jugement principal plutôt que le TM6 pour deux raisons principales.

La première, expliquée précédemment, découle du fait que ce format est plus accessible aux patients amputés d'autant plus avec une étiologie vasculaire en raison d'une fatigabilité importante compte tenu des comorbidités [7] souvent associées et de l'âge généralement avancée. Nous nous assurons par ce fait qu'une plus grande proportion de patient inclus pourra y participer.

La deuxième raison concerne le nombre de sujet nécessaire (NSN). En effet, en lisant les données de la littérature concernant les distances moyennes réalisés par les patients amputés lors du TM6, l'écart type était systématiquement très important (> 100 mètres) induisant un NSN très important. En l'occurrence, l'étude de Reid et al. [82] en 2015 que nous avons retenu, incluait 21 patients amputés dont l'étiologie était vasculaire, et objectivait une distance moyenne de 345.1 mètres avec un écart-type de 104.4m. En prenant le MDC du TM6 retrouvé à 54 mètres dans cette population [85], le NSN calculé était de 89 patients par groupe. Cela n'était pas réalisable dans une étude mono centrique et difficile à élaborer, en dehors d'une étude pilote.

2.2 Choix du L-Test

Le L-test a principalement été choisi pour palier à l'effet plafond souvent décrit avec le TUG test [90]. *Saruco et al.* [81] l'ont d'ailleurs décrit comme explication potentielle de l'absence d'évolution significative du TUG test dans leur étude en raison de temps rapidement améliorés dans les deux groupes. Il permet d'évaluer les changements de direction et les transferts avec un temps corrélé au risque de chute comme le TUG.

2.3 Choix des analyses en Analyse Fonctionnelle de la Marche

L'analyse qualitative de la marche semble très pertinente puisqu'il s'agit d'un axe important du protocole d'imagerie de cette étude. La marche du patient amputé trans-tibiale se déroulant avec une augmentation de la quantité d'appui côté sain et un allongement de longueur de pas côté appareillé [18], il semble intéressant de savoir si la symétrie de la marche est améliorée par l'IM, ce qui pourrait engendrer une moindre dépense énergétique et des capacités fonctionnelles augmentées.

Vanmairis [79] a montré une tendance à l'amélioration de la symétrie de longueur de pas ainsi que, dans une moindre mesure, de quantité d'appui. Elle n'a cependant pas montré de différence notable concernant la vitesse de marche, tout comme *Saruco et al.* [81]

Cunha et al. [78] avaient également des données positives concernant l'AQM avec une meilleure absorption des chocs, une capacité de propulsion améliorée, et un meilleur contrôle de l'équilibre du membre prothétique.

Nous souhaitons confirmer ces données pré existantes.

2.4 Choix du TAPES-R-F

Cet auto-questionnaire évalue de façon multidimensionnelle l'adaptation du patient amputé à sa prothèse sur les versants psycho-sociales, limitations d'activités et satisfaction de la prothèse. Il permet de mesurer de manière approfondie l'expérience de vie des amputés. Si l'IM entraîne une amélioration de la marche sur le plan quantitatif et/ou qualitatif, cela pourrait se traduire par une meilleure adaptation générale que nous souhaitons rechercher.

La durée de passation pour compléter ce questionnaire est rapide, environ 5-10 minutes.

2.5 Choix du questionnaire SIGAM-FR

Le SIGAM-FR est un outil reconnu pour évaluer l'aptitude à la marche et le niveau fonctionnel des amputés. Il offre une évaluation multidimensionnelle en prenant en compte à la fois les capacités physiques et l'autonomie dans la vie quotidienne, ce qui permet d'obtenir une vue d'ensemble des progrès fonctionnels du patient après son retour à domicile. Cependant, il a été validé uniquement pour des individus portant leur prothèse depuis au moins 6 mois [111]. Dans notre étude, nous envisageons de l'utiliser autour de 4 mois, ce qui pourrait être légèrement précoce par rapport à la période recommandée pour sa pleine validité dans la littérature.

Malgré cela, le SIGAM-FR présente l'avantage de classer les patients en 6 catégories distinctes, évaluant les limitations d'activités liées à la marche, contrairement aux échelles de Houghton et au Prosthetic Profile of the Amputee (PPA) dont l'intérêt est similaire mais qui n'en comptent que 3.

3 Forces et limites de l'étude

3.1 Forces de l'étude

La qualité méthodologique de cette étude est solide avec le recrutement d'une population homogène en terme de niveau et d'étiologie d'amputation, la réalisation d'une randomisation tardive en amont des premiers tests, l'utilisation d'outils d'évaluation validés et la création d'un protocole de rééducation par IM en lien avec les règles de bonne pratique retrouvés dans la littérature et la volonté d'une standardisation de celui-ci afin de s'assurer que chaque patient bénéficie des mêmes consignes.

Le groupe contrôle effectue une tâche cognitive neutre axé sur la relaxation, qui est une technique souvent utilisé en rééducation de manière générale [101].

Sacuro et al [81], dans leur étude contrôlée, incluent des participants tant transfémoraux que transtibiaux, sans distinction d'étiologie. De plus, il n'est pas réalisé d'analyses en sous-groupes en fonction du type de pied ou de genou prothétique, ce qui pouvait introduire des biais dans l'analyse des résultats. Nous essayons d'adopter une approche qui permet de minimiser les biais, en tenant compte des spécificités des types de prothèses et d'étiologies, afin d'obtenir des résultats plus précis.

Les résultats moyens utilisés pour le calcul du nombre de sujets nécessaires dans notre étude proviennent d'une population très similaire à la nôtre. Le groupe concerné, ayant une performance moyenne de 130,9 m \pm 35 m au test de marche de 2 minutes, est désigné sous le terme "disease" dans l'étude de référence [97], incluant principalement des patients atteints d'étiologies diabétiques et vasculaires, bien que

certaines pathologies infectieuses telles que l'ostéomyélite, le lupus, ou les infections post-opératoires y soient également présentes. Même si la répartition exacte des pathologies n'est pas précisée, il est raisonnable de supposer que les causes diabétiques et vasculaires sont largement prédominantes.

Il est également intéressant de noter que, selon la classification MFCL (Medicare Functional Classification Level), le niveau K3, qui correspond à un niveau d'autonomie permettant de se déplacer de manière indépendante en extérieur, présente une performance moyenne de $138,4 \text{ m} \pm 28,5 \text{ m}$. En comparaison, le niveau K2, qui reflète une autonomie plus limitée avec la capacité de marcher uniquement dans des environnements simples, affiche une moyenne de $81,7 \text{ m} \pm 26,9 \text{ m}$.

Bien qu'il aurait été pertinent de stratifier notre groupe en fonction du K-level, cette classification n'est pas encore validée en France. En tout état de cause, notre nombre de sujets nécessaires (NSN) de 18 par groupe demeure supérieur à ce qu'il aurait été si nous avions utilisé les valeurs associées au MFCL, ce qui garantit le respect de la puissance statistique de l'étude. De plus, notre moyenne retenue se situe entre les niveaux K2 et K3, ce qui reflète bien la réalité de notre population, composée de patients pouvant avoir une autonomie variable, mais correspondant souvent à cet intervalle K2-K3.

Concernant les analyses statistiques, la décision de procéder à des analyses en sous-groupes semblait nécessaire afin de mieux cerner les particularités de chaque catégorie de patients. Nous avons pris en compte des variables telles que le type de pied prothétique, qui peut influencer la qualité de la marche, le confort et l'adaptation

à la prothèse, ainsi que le niveau d'activité physique antérieur à la chirurgie, mesuré par l'IPAQ-SF, qui est un facteur déterminant de la récupération fonctionnelle post-amputation. Cette stratification permet d'obtenir des résultats plus spécifiques, en évitant de généraliser des conclusions qui pourraient masquer des différences interindividuelles significatives.

3.2 Limites et difficultés attendus de l'étude

En recrutant uniquement des patients amputés trans-tibiaux d'origine vasculaire ou diabétique, il pourrait être difficile d'extrapoler nos résultats à l'ensemble de la population des amputés. Ce choix de recrutement pourrait limiter la **validité externe** de l'étude, c'est-à-dire la capacité à généraliser les résultats à d'autres groupes de patients amputés présentant des étiologies différentes.

Ensuite, la dernière phase de tests (T3) est réalisée à 6 semaines de la sortie ce qui en fait un délai relativement proche de l'intervention. Il serait intéressant dans les études à venir d'évaluer les effets potentiels à plus long terme. Pour rappel il a été démontré que l'IM avait un impact sur la rétention et donc sur l'apprentissage à long terme.

Il est important de noter que notre étude ne prévoit pas la réalisation d'imagerie motrice (IM) en autonomie, bien que cela pourrait représenter un avantage significatif pour cette technique de rééducation. Ce choix a été fait principalement pour des raisons méthodologiques : il est difficile de garantir la bonne exécution des exercices sans supervision directe. À notre connaissance, cette approche n'a pas encore été explorée dans la littérature. Initialement, il avait été envisagé d'inclure un travail personnel en

autonomie à domicile après la sortie du centre de rééducation, avec un suivi basé sur un "cahier des charges" à remplir par le patient, permettant une preuve de l'assiduité. Cette idée pourrait être une piste intéressante pour de futures recherches.

En théorie, le patient pourrait intégrer l'imagerie motrice dans sa vie quotidienne, notamment en complément de ses activités motrices habituelles, quelles qu'elles soient.

Une autre limite de l'étude est la difficulté potentielle à garantir une homogénéité dans le niveau de motivation des patients, ce qui pourrait influencer leur adhésion au protocole d'IM. Bien que l'intérêt soit expliqué de manière claire et concise, plusieurs facteurs pourraient diminuer la motivation des participants, tels qu'une diminution de l'humeur due à un état de santé dégradé (35% des patients amputés souffrent de dépression dans les six premiers mois post opératoire et 60% de troubles anxieux (*Melcer et al. in Jo et al.*) [112,113] ou même des doutes sur l'efficacité potentielle de l'IM. Cette baisse de motivation pourrait entraîner un manque d'implication dans les exercices mentaux et par conséquent une répercussion sur une potentielle progression.

Pour atténuer ce problème, chaque séance d'imagerie sera contrôlée, comme précisé dans le protocole. Par exemple, une évaluation sera effectuée à l'aide d'une échelle de Likert de 0 à 7 ou par une demande de description de la perception visuelle et kinesthésique de l'exercice. De plus, indépendamment du groupe auquel ils sont assignés, chaque patient recevra des encouragements et bénéficiera d'un suivi personnalisé afin de soutenir leur engagement et leur motivation.

4 Implications cliniques potentielles

Optimisation des protocoles de rééducation

Les résultats de cette étude pourraient encourager l'intégration de l'imagerie motrice (IM) dans les protocoles standards de rééducation des amputés. Actuellement, la rééducation classique se concentre sur les exercices physiques et fonctionnels, mais l'ajout de l'IM, une technique basée sur la visualisation mentale de mouvements, pourrait accélérer les progrès dans l'apprentissage moteur, améliorer la marche et réduire la durée de rééducation. Concernant ce dernier point, Saruco et al. [81] retrouvait une amélioration plus rapide du niveau fonctionnel et une sortie plus précoce de centre de rééducation dans le groupe IM.

Cela permettrait potentiellement de raccourcir la durée de séjour en centre de rééducation, soit un objectif majeur pour améliorer l'efficacité des soins.

Approche non invasive et peu coûteuse

L'imagerie motrice est une technique particulièrement intéressante car elle est **non invasive, peu coûteuse** et **facilement accessible**. Contrairement à d'autres approches de rééducation avancées qui peuvent nécessiter des équipements coûteux ou du personnel hautement qualifié, l'IM peut être enseignée à des patients de manière relativement simple. Cela en fait une méthode attractive pour les centres de rééducation avec des ressources limitées, ainsi que pour les patients en rééducation à domicile ou en ambulatoire.

Accessibilité pour certaines populations à risque

Les amputés d'étiologie vasculaire représentent une population souvent comorbide et

fatigable, pour qui les méthodes de rééducation intensive peuvent parfois être contre-indiquées ou difficiles à suivre. L'IM, en tant que méthode cognitive permet de **travailler sans exiger d'effort physique**, ce qui est crucial pour les personnes âgées ou celles avec des maladies cardiovasculaires, par exemple.

Education des professionnels de santé

Les résultats de l'étude pourraient aussi stimuler la formation des professionnels de santé, notamment les kinésithérapeutes et les médecins de médecine physique et réadaptation, à l'utilisation de l'imagerie motrice. Cette technique, bien qu'encore sous-utilisée, pourrait devenir un outil standard dans les stratégies de rééducation, surtout en complément des thérapies physiques traditionnelles.

5 Perspectives pour l'avenir

5.1 Perspectives pour l'avenir et idée d'un deuxième protocole

Nous avons élaboré une méthodologie qui nous semblait adaptée pour une étude future. L'objectif serait d'inclure des patients amputés, sans distinction d'étiologie ou d'âge, dans un centre spécialisé. Cette approche se déroulerait en deux phases distinctes :

- **Première phase** : Inclusion d'un groupe expérimental, où un travail complémentaire en imagerie motrice (IM) serait réalisé. Le nombre de patients inclus serait arbitraire, par exemple 20.
- **Deuxième phase** : Inclusion d'un groupe témoin, où aucune intervention d'IM ne serait réalisée. À la place, les patients participeraient à des séances de

relaxation ou à une tâche cognitive neutre. Le nombre de patients serait également arbitraire, mais plus important, par exemple 60.

La rééducation classique reste identique entre les deux groupes, tout comme les évaluations cliniques utilisées pour mesurer les performances fonctionnelles.

Afin d'améliorer la robustesse de l'analyse des résultats, nous envisageons d'appliquer une **méthode d'appariement entre les groupes**. Concrètement, cela consisterait à sélectionner, dans le groupe témoin, des patients « clones » du groupe expérimental, c'est-à-dire des individus présentant des caractéristiques cliniques et démographiques similaires (âge, taille, poids, étiologie, comorbidités, performance initiale aux tests). Cette approche permettrait de minimiser les biais liés à la variabilité interindividuelle et d'obtenir une comparaison plus précise de l'impact de l'imagerie motrice sur la rééducation.

L'inclusion pourrait être séquentielle afin de s'affranchir du risque de contamination entre les groupes (éviter que des participants ne partagent des informations concernant les interventions), ce qui pourrait influencer les résultats. Un appariement strict et des critères de sélection bien définis nous permettraient de contrôler les variables confondantes et d'optimiser la validité des conclusions.

Cette approche offre plusieurs avantages méthodologiques. D'une part, elle permet d'inclure une population hétérogène tout en assurant une comparaison valide entre les groupes. D'autre part, elle évite les contraintes liées à la stratification des étiologies, ce qui simplifie le recrutement des participants et améliore la faisabilité de l'étude. En

élargissant les critères d'inclusion, nous pourrions atteindre plus facilement un nombre suffisant de participants, garantissant ainsi la puissance statistique de l'analyse.

En résumé, cette flexibilité méthodologique, couplée à l'appariement, permettrait de réaliser une étude rigoureuse tout en facilitant l'inclusion de patients avec des profils variés. Cela permettrait aussi de tirer des conclusions plus globales et pertinentes pour une population d'amputés diversifiée.

5.2 Vers une utilisation concomitante de la stimulation trans crânienne ?

Pour aller plus loin et conclure cette discussion, nous parlerons de la stimulation transcrânienne à courant continu (tDCS) qui est « une technique de neuromodulation non invasive qui induit, selon la polarité de la stimulation, une augmentation ou une diminution de l'excitabilité corticale » [114].

L'influence sur l'activité neuronale dépend de l'endroit où sont placées anodes et cathodes. On parle alors de :

- tDCS anodique (électrode positive placée en regard de la zone cible), qui tend à augmenter l'excitabilité corticale d'une région cérébrale dont l'objectif est de potentialiser la communication inter-neuronale.
- tDCS cathodique (électrode négative placée en regard de la zone cible), dont le but est au contraire de diminuer l'activité corticale afin de ralentir la communication inter-neurones.

Son utilisation de façon complémentaire à la pratique de l'IM semble alors intéressante.

Foerster et al. [115] ont montré en 2013 chez des sujets sains que la tDCS anodale améliorait de façon significative la fonction motrice (tests d'écriture) induite par l'IM en comparaison à un groupe contrôle placebo utilisant la tDCS de manière factice. Ces effets étaient particulièrement retrouvés lors de la stimulation de M1 (zone motrice primaire, située dans le lobe frontal).

Dans le domaine de la rééducation, une étude contrôlée randomisée menée par Kashoo et al. [116] en 2022 a montré une amélioration significative de tests fonctionnels de membre supérieur chez des patients hémiparétiques post AVC chroniques après un entraînement IM + tDCS anodale durant 10 jours, en comparaison à la tDCS factice.

Ces découvertes suggèrent que cette technique pourrait offrir un potentiel considérable pour améliorer les performances motrices, notamment lorsqu'elle est combinée avec l'imagerie motrice. Des études futures sur la population amputée pourraient s'avérer très pertinentes pour optimiser l'entraînement à la marche et maximiser les bénéfices de cette approche.

Conclusion

Ce travail propose un protocole d'étude pour un essai clinique interventionnel, contrôlé et randomisé, visant à évaluer l'impact de l'imagerie motrice durant la phase prothétique associée à la rééducation classique chez des patients amputés trans-tibiaux d'étiologie vasculaire ou diabétique. Cette approche, à la fois simple et peu coûteuse, pourrait optimiser les résultats de la rééducation en augmentant le nombre de répétitions mentales des exercices, tout en renforçant les schémas moteurs et la phase d'anticipation du mouvement au niveau cortical.

Si l'amélioration des performances à la marche se confirment par l'intermédiaire de cette étude, nous pourrions un peu plus encore envisager de présenter cette technique comme complémentaire de l'entraînement physique dans cette population. Notons l'importance potentielle de démarrer ce type de rééducation le plus tôt possible, dès la phase pré-prothétique, et la nécessité de réaliser des études supplémentaires afin d'évaluer cette technique à l'ensemble de la population amputée c'est-à-dire quel que soit l'âge, le niveau ou l'étiologie de l'amputation.

Bibliographie

- [1] Amputation de membre inférieur - Niveaux d'amputation. Physiostudent. Lien : <https://www.physiostudent.fr/cours/themes/amputation-du-membre-inferieur-1/niveaux-d-amputation-5> n.d.
- [2] Fosse S, Hartemann-Heurtier A, Jacqueminet S, Ha Van G, Grimaldi A, Fagot-Campagna A. Incidence and characteristics of lower limb amputations in people with diabetes. *Diabet Med* 2009;26:391–6. <https://doi.org/10.1111/j.1464-5491.2009.02698.x>.
- [3] Bruyant A, Guemann M, Malgoyre A. Étude épidémiologique des amputations majeures des membres supérieur et inférieur en France. *Kinésithérapie Rev* 2023;23:3–12. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2022.05.014>.
- [4] Santé Publique France. L'état de santé de la population en France. Suivi des objectifs annexés à la loi de santé publique - Rapport 2011 : complications du diabète, page 266 à 269. 2011.
- [5] Imam B, Miller WC, Finlayson HC, Eng JJ, Jarus T. Incidence of lower limb amputation in Canada. *Can J Public Health* 2017;108:374–80. <https://doi.org/10.17269/CJPH.108.6093>.
- [6] The rehabilitation of the amputee in the developing world: a review of the literature | O&P Virtual Library n.d. https://www.oandplibrary.org/poi/1996_01_045.asp (accessed September 17, 2024).
- [7] Kalbaugh CA, Strassle PD, Paul NJ, McGinagle KL, Kibbe MR, Marston WA. Trends in Surgical Indications for Major Lower Limb Amputation in the USA from 2000 to 2016. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 2020;60:88–96. <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2020.03.018>.
- [8] Singh RK, Prasad G. Long-term mortality after lower-limb amputation. *Prosthet Orthot Int* 2016;40:545–51. <https://doi.org/10.1177/0309364615596067>.
- [9] Meshkin DH, Zolper EG, Chang K, Bryant M, Bekeny JC, Evans KK, et al. Long-term Mortality After Nontraumatic Major Lower Extremity Amputation: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Foot Ankle Surg* 2021;60:567–76. <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2020.06.027>.
- [10] Dillingham TR, Pezzin LE. Rehabilitation Setting and Associated Mortality and Medical Stability Among Persons With Amputations. *Arch Phys Med Rehabil* 2008;89:1038–45. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2007.11.034>.
- [11] Davie-Smith F, Coulter E, Kennon B, Wyke S, Paul L. Factors influencing quality of life following lower limb amputation for peripheral arterial occlusive disease: A systematic review of the literature. *Prosthet Orthot Int* 2017;41:537–47. <https://doi.org/10.1177/0309364617690394>.
- [12] Van Der Schans CP, Geertzen JHB, Schoppen T, Dijkstra PU. Phantom Pain and Health-Related Quality of Life in Lower Limb Amputees. *J Pain Symptom Manage* 2002;24:429–36. [https://doi.org/10.1016/S0885-3924\(02\)00511-0](https://doi.org/10.1016/S0885-3924(02)00511-0).
- [13] Fusetti C, Sénéchaud C, Merlini M. La qualité de vie des patients vasculaires amputés. *Ann Chir* 2001;126:434–9. [https://doi.org/10.1016/S0003-3944\(01\)00541-7](https://doi.org/10.1016/S0003-3944(01)00541-7).
- [14] Appareillage pour amputés tibiaux, Claroline Connect - Université Lyon 1 n.d. https://clarolineconnect.univ-lyon1.fr/resource/open/icap_wiki/3887643#/ (accessed September 10, 2024).

- [15] Lower limb traumatic amputation: radiological features of post-surgical changes and complications of the stump. European Society for Surgical Research (ESSR), congrès 2023. Lien : <https://www.essr2023.org/formulario-comunicaciones/posters/3baec285d8f54ce3e371240e0c3929f4.pdf> n.d.
- [16] Haute autorité de santé. Prise en charge de l'artériopathie chronique oblitérante athéroscléreuse des membres inférieurs (indications médicamenteuses, de revascularisation et de rééducation) n.d.
- [17] Fraisse N, Martinet N, Kpadonou T-J, Paysant J, Blum A, André J-M. Les muscles de l'amputé tibial. *Ann Réadapt Médecine Phys* 2008;51:218–27. <https://doi.org/10.1016/j.annrmp.2008.01.012>.
- [18] Kovac I, Medved V, Ostojic L. Spatial, temporal and kinematic characteristics of traumatic transtibial amputees' gait. *Coll Antropol* 2010;34 Suppl 1:205–13.
- [19] Skinner HB, Effeney DJ. Gait analysis in amputees. *Am J Phys Med* 1985;64:82–9.
- [20] Czerniecki JM, Gitter AJ, Beck JC. Energy transfer mechanisms as a compensatory strategy in below knee amputee runners. *J Biomech* 1996;29:717–22. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(95\)00173-5](https://doi.org/10.1016/0021-9290(95)00173-5).
- [21] Houdijk H, Pollmann E, Groenewold M, Wiggerts H, Polomski W. The energy cost for the step-to-step transition in amputee walking. *Gait Posture* 2009;30:35–40. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.02.009>.
- [22] Kishner S. Gait Analysis After Amputation: Overview, Gait Cycle, Adaptive Strategies of Those Who Have Undergone Amputations 2023.
- [23] Donker SF, Beek PJ. Interlimb coordination in prosthetic walking: Effects of asymmetry and walking velocity. *Acta Psychol (Amst)* 2002;110:265–88. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(02\)00037-9](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(02)00037-9).
- [24] Gailey R. Review of secondary physical conditions associated with lower-limb amputation and long-term prosthesis use. *J Rehabil Res Dev* 2008;45:15–30. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2006.11.0147>.
- [25] Jiang G, Yin X, Li C, Li L, Zhao L, Evans AC, et al. The Plasticity of Brain Gray Matter and White Matter following Lower Limb Amputation. *Neural Plast* 2015;2015:1–10. <https://doi.org/10.1155/2015/823185>.
- [26] Di Pino G, Guglielmelli E, Rossini PM. Neuroplasticity in amputees: Main implications on bidirectional interfacing of cybernetic hand prostheses. *Prog Neurobiol* 2009;88:114–26. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2009.03.001>.
- [27] Flor H, Nikolajsen L, Staehelin Jensen T. Phantom limb pain: a case of maladaptive CNS plasticity? *Nat Rev Neurosci* 2006;7:873–81. <https://doi.org/10.1038/nrn1991>.
- [28] Lebon F. Efficience du travail mental sur le développement et le recouvrement des capacités motrices: force musculaire et imagerie motrice n.d.
- [29] Jeannerod M. The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behav Brain Sci* 1994;17:187–202. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00034026>.
- [30] Puyjarinet Frédéric. Principes et intérêts de la pratique de l'imagerie motrice en rééducation psychomotrice n.d.
- [31] Malouin F, Saimpont A, Jackson PL, Richards CL. Optimiser la récupération locomotrice par l'imagerie motrice. *Mov Sport Sci* 2013;n° 82:129. <https://doi.org/10.3917/sm.082.0129>.
- [32] Schuster C, Hilfiker R, Amft O, Scheidhauer A, Andrews B, Butler J, et al. Best practice for motor imagery: a systematic literature review on motor imagery training elements in five different disciplines. *BMC Med* 2011;9:75.

<https://doi.org/10.1186/1741-7015-9-75>.

- [33] Guillot A, Collet C. Construction of the Motor Imagery Integrative Model in Sport: a review and theoretical investigation of motor imagery use. *Int Rev Sport Exerc Psychol* 2008;1:31–44. <https://doi.org/10.1080/17509840701823139>.
- [34] Hegazy K, Sherif AM, Houta SS. The Effect of Mental Training on Motor Performance of Tennis and Field Hockey Strokes in Novice Players. *Adv Phys Educ* 2015;05:77–83. <https://doi.org/10.4236/ape.2015.52010>.
- [35] Charrier A, Mangin M, Monnin D, Allet L. Effet du modèle d'imagerie motrice « PTTLEP » pour améliorer les performances au football : cas du dribble et du penalty. *Revue de la littérature* 2019.
- [36] Guillot A, Debarnot U, Monarchi-Comte Y, Di Rienzo F. Questioning the transfer effect of motor imagery benefits: The neglected variable of interest. *Asian J Sport Exerc Psychol* 2022;2:91–8. <https://doi.org/10.1016/j.ajsep.2022.08.001>.
- [37] Stephan KM, Fink GR, Passingham RE, Silbersweig D, Ceballos-Baumann AO, Frith CD, et al. Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *J Neurophysiol* 1995;73:373–86. <https://doi.org/10.1152/jn.1995.73.1.373>.
- [38] Stippich C, Ochmann H, Sartor K. Somatotopic mapping of the human primary sensorimotor cortex during motor imagery and motor execution by functional magnetic resonance imaging. *Neurosci Lett* 2002;331:50–4. [https://doi.org/10.1016/s0304-3940\(02\)00826-1](https://doi.org/10.1016/s0304-3940(02)00826-1).
- [39] Iseki K, Hanakawa T, Shinozaki J, Nankaku M, Fukuyama H. Neural mechanisms involved in mental imagery and observation of gait. *NeuroImage* 2008;41:1021–31. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.03.010>.
- [40] Sirigu A, Duhamel J-R, Cohen L, Pillon B, Dubois B, Agid Y. The Mental Representation of Hand Movements After Parietal Cortex Damage. *Science* 1996;273:1564–8. <https://doi.org/10.1126/science.273.5281.1564>.
- [41] Gerardin E, Sirigu A, Lehericy S, Poline JB, Gaymard B, Marsault C, et al. Partially overlapping neural networks for real and imagined hand movements. *Cereb Cortex N Y N* 1991 2000;10:1093–104. <https://doi.org/10.1093/cercor/10.11.1093>.
- [42] Héту S, Grégoire M, Saimpont A, Coll M-P, Eugène F, Michon P-E, et al. The neural network of motor imagery: An ALE meta-analysis. *Neurosci Biobehav Rev* 2013;37:930–49. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.03.017>.
- [43] Miyai I, Tanabe HC, Sase I, Eda H, Oda I, Konishi I, et al. Cortical Mapping of Gait in Humans: A Near-Infrared Spectroscopic Topography Study. *NeuroImage* 2001;14:1186–92. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0905>.
- [44] Bakker M, De Lange FP, Helmich RC, Scheeringa R, Bloem BR, Toni I. Cerebral correlates of motor imagery of normal and precision gait. *NeuroImage* 2008;41:998–1010. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.03.020>.
- [45] Malouin F, Richards CL, Jackson PL, Dumas F, Doyon J. Brain activations during motor imagery of locomotor-related tasks: a PET study. *Hum Brain Mapp* 2003;19:47–62. <https://doi.org/10.1002/hbm.10103>.
- [46] Gandevia SC, Wilson LR, Inglis JT, Burke D. Mental rehearsal of motor tasks recruits α -motoneurons but fails to recruit human fusimotor neurones selectively. *J Physiol* 1997;505:259–66. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.1997.259bc.x>.
- [47] Grosprêtre S, Ruffino C, Lebon F. Motor imagery and cortico-spinal excitability: A review. *Eur J Sport Sci* 2016;16:317–24. <https://doi.org/10.1080/17461391.2015.1024756>.
- [48] Vargas CD, Olivier E, Craighero L, Fadiga L, Duhamel JR, Sirigu A. The

- influence of hand posture on corticospinal excitability during motor imagery: a transcranial magnetic stimulation study. *Cereb Cortex N Y N* 1991 2004;14:1200–6. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhh080>.
- [49] Decety J, Jeannerod M, Germain M, Pastene J. Vegetative response during imagined movement is proportional to mental effort. *Behav Brain Res* 1991;42:1–5. [https://doi.org/10.1016/S0166-4328\(05\)80033-6](https://doi.org/10.1016/S0166-4328(05)80033-6).
- [50] Gandevia SC, Killian K, McKenzie DK, Crawford M, Allen GM, Gorman RB, et al. Respiratory sensations, cardiovascular control, kinaesthesia and transcranial stimulation during paralysis in humans. *J Physiol* 1993;470:85–107. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1993.sp019849>.
- [51] Guillot A, Hoyek N, Louis M, Collet C. Understanding the timing of motor imagery: recent findings and future directions. *Int Rev Sport Exerc Psychol* 2012;5:3–22. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2011.623787>.
- [52] Guillot A, Collet C. Duration of Mentally Simulated Movement: A Review. *J Mot Behav* 2005;37:10–20. <https://doi.org/10.3200/JMBR.37.1.10-20>.
- [53] Decety J, Jeannerod M, Prablanc C. The timing of mentally represented actions. *Behav Brain Res* 1989;34:35–42. [https://doi.org/10.1016/s0166-4328\(89\)80088-9](https://doi.org/10.1016/s0166-4328(89)80088-9).
- [54] Malouin F, Richards CL. Mental Practice for Relearning Locomotor Skills. *Phys Ther* 2010;90:240–51. <https://doi.org/10.2522/ptj.20090029>.
- [55] Guillot A, Collet C, Nguyen VA, Malouin F, Richards C, Doyon J. Brain activity during visual versus kinesthetic imagery: an fMRI study. *Hum Brain Mapp* 2009;30:2157–72. <https://doi.org/10.1002/hbm.20658>.
- [56] Guillot A, Collet C, Nguyen VA, Malouin F, Richards C, Doyon J. Functional neuroanatomical networks associated with expertise in motor imagery. *NeuroImage* 2008;41:1471–83. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.03.042>.
- [57] Saruco E. Imagerie motrice et amputation du membre inférieur n.d.
- [58] Chang Y, Lee J-J, Seo J-H, Song H-J, Kim Y-T, Lee HJ, et al. Neural correlates of motor imagery for elite archers. *NMR Biomed* 2011;24:366–72. <https://doi.org/10.1002/nbm.1600>.
- [59] Florent Lebon, Nicolas Gueugneau, Charalambos Papaxanthis. Modèles internes et imagerie motrice, Florent Lebon, Nicolas Gueugneau, Charalambos Papaxanthis Dans *Movement & Sport Sciences - Science & Motricité* 2013/4 (n° 82), pages 51 à 61 ÉditionsEDP Sciences 2013.
- [60] Pascual-Leone A, Nguyet D, Cohen LG, Brasil-Neto JP, Cammarota A, Hallett M. Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *J Neurophysiol* 1995;74:1037–45. <https://doi.org/10.1152/jn.1995.74.3.1037>.
- [61] Grangeon M, Guillot A, Collet C. Effets de l'imagerie motrice dans la rééducation de lésions du système nerveux central et des atteintes musculo-articulaires. *Mov Sport Sci* 2009;67:9–38. <https://doi.org/10.3917/sm.067.0009>.
- [62] Malouin F, Richards CL, Durand A, Descent M, Poiré D, Frémont P, et al. Effects of practice, visual loss, limb amputation, and disuse on motor imagery vividness. *Neurorehabil Neural Repair* 2009;23:449–63. <https://doi.org/10.1177/1545968308328733>.
- [63] Sirigu A, Duhamel JR. Motor and Visual Imagery as Two Complementary but Neurally Dissociable Mental Processes. *J Cogn Neurosci* 2001;13:910–9. <https://doi.org/10.1162/089892901753165827>.
- [64] Gregg M, Hall C, Butler A. The MIQ-RS: A Suitable Option for Examining

- Movement Imagery Ability. *Evid Based Complement Alternat Med* 2010;7:249–57. <https://doi.org/10.1093/ecam/nem170>.
- [65] Loison B, Moussaddaq A-S, Cormier J, Richard I, Ferrapie A-L, Ramond A, et al. Translation and validation of the French Movement Imagery Questionnaire – Revised Second version (MIQ-RS). *Ann Phys Rehabil Med* 2013;56:157–73. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2013.01.001>.
- [66] Malouin F, Richards CL, Jackson PL, Lafleur MF, Durand A, Doyon J. The Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire (KVIQ) for assessing motor imagery in persons with physical disabilities: a reliability and construct validity study. *J Neurol Phys Ther JNPT* 2007;31:20–9. <https://doi.org/10.1097/01.npt.0000260567.24122.64>.
- [67] Ferguson GD, Wilson PH, Smits-Engelsman BCM. The influence of task paradigm on motor imagery ability in children with Developmental Coordination Disorder. *Hum Mov Sci* 2015;44:81–90. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.08.016>.
- [68] Malouin F, Jackson P, Richards C. Towards the integration of mental practice in rehabilitation programs. A critical review. *Front Hum Neurosci* 2013;7.
- [69] Holmes & Collins. *The PETTLEP Approach to Motor Imagery: A Functional Equivalence Model for Sport Psychologists* 2001.
- [70] Dunskey A, Dickstein R, Ariav C, Deutsch J, Marcovitz E. Motor imagery practice in gait rehabilitation of chronic post-stroke hemiparesis: four case studies. *Int J Rehabil Res Int Z Rehabil Rev Int Rech Readaptation* 2006;29:351–6. <https://doi.org/10.1097/MRR.0b013e328010f559>.
- [71] Dunskey A, Dickstein R, Marcovitz E, Levy S, Deutsch JE. Home-based motor imagery training for gait rehabilitation of people with chronic poststroke hemiparesis. *Arch Phys Med Rehabil* 2008;89:1580–8. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2007.12.039>.
- [72] Hwang S, Jeon H-S, Yi C, Kwon O, Cho S, You S. Locomotor imagery training improves gait performance in people with chronic hemiparetic stroke: a controlled clinical trial. *Clin Rehabil* 2010;24:514–22. <https://doi.org/10.1177/0269215509360640>.
- [73] Cho H, Kim J, Lee G-C. Effects of motor imagery training on balance and gait abilities in post-stroke patients: a randomized controlled trial. *Clin Rehabil* 2013;27:675–80. <https://doi.org/10.1177/0269215512464702>.
- [74] Verma R, Arya KN, Garg RK, Singh T. Task-oriented circuit class training program with motor imagery for gait rehabilitation in poststroke patients: a randomized controlled trial. *Top Stroke Rehabil* 2011;18 Suppl 1:620–32. <https://doi.org/10.1310/tsr18s01-620>.
- [75] Guerra ZF, Lucchetti ALG, Lucchetti G. Motor Imagery Training After Stroke: A Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *J Neurol Phys Ther* 2017;41:205–14. <https://doi.org/10.1097/NPT.0000000000000200>.
- [76] Li R-Q, Li Z-M, Tan J-Y, Chen G-L, Lin W-Y. Effects of motor imagery on walking function and balance in patients after stroke: A quantitative synthesis of randomized controlled trials. *Complement Ther Clin Pract* 2017;28:75–84. <https://doi.org/10.1016/j.ctcp.2017.05.009>.
- [77] Zhao LJ, Jiang LH, Zhang H, Li Y, Sun P, Liu Y, et al. Effects of Motor Imagery Training for Lower Limb Dysfunction in Patients With Stroke: A Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *Am J Phys Med Rehabil* 2023;102:409–18. <https://doi.org/10.1097/PHM.0000000000002107>.
- [78] Cunha RG, Da-Silva PJG, Dos Santos Couto Paz CC, Da Silva Ferreira AC,

- Tierra-Criollo CJ. Influence of functional task-oriented mental practice on the gait of transtibial amputees: a randomized, clinical trial. *J NeuroEngineering Rehabil* 2017;14:28. <https://doi.org/10.1186/s12984-017-0238-x>.
- [79] Vanmairis J. L'imagerie motrice dans la rééducation de la marche des amputés trans-tibiaux d'origine vasculaire. *Kinésithérapie Rev* 2018;18:2–12. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2017.11.080>.
- [80] Matalon R, Freund JE, Vallabhajosula S. Functional rehabilitation of a person with transfemoral amputation through guided motor imagery: a case study. *Physiother Theory Pract* 2021;37:224–33. <https://doi.org/10.1080/09593985.2019.1625090>.
- [81] Saruco E, Saimpont A, Di Rienzo F, De Witte B, Laroyenne I, Matéo F, et al. Towards efficient motor imagery interventions after lower-limb amputation. *J NeuroEngineering Rehabil* 2024;21:55. <https://doi.org/10.1186/s12984-024-01348-3>.
- [82] Reid L, Thomson P, Besemann M, Dudek N. Going places: Does the two-minute walk test predict the six-minute walk test in lower extremity amputees? *J Rehabil Med* 2015;47:256–61. <https://doi.org/10.2340/16501977-1916>.
- [83] Gremeaux V, Damak S, Troisgros O, Feki A, Laroche D, Perennou D, et al. Selecting a test for the clinical assessment of balance and walking capacity at the definitive fitting state after unilateral amputation: a comparative study. *Prosthet Orthot Int* 2012;36:415–22. <https://doi.org/10.1177/0309364612437904>.
- [84] Pin TW. Psychometric Properties of 2-Minute Walk Test: A Systematic Review. *Arch Phys Med Rehabil* 2014;95:1759–75. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.03.034>.
- [85] Resnik L, Borgia M. Reliability of Outcome Measures for People With Lower-Limb Amputations: Distinguishing True Change From Statistical Error. *Phys Ther* 2011;91:555–65. <https://doi.org/10.2522/ptj.20100287>.
- [86] Reinmann A, Gafner SC, Bruyneel A-V. Évaluation de la capacité fonctionnelle de marche : test de marche de deux minutes. *Kinésithérapie Rev* 2023;23:52–7. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2023.02.001>.
- [87] Vancampfort D, Kimbowa S, Basangwa D, Smith L, Stubbs B, Van Damme T, et al. Test-retest reliability, concurrent validity and correlates of the two-minute walk test in outpatients with psychosis. *Psychiatry Res* 2019;282:112619. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2019.112619>.
- [88] Baker R, Esquenazi A, Benedetti MG, Desloovere K. Gait analysis: clinical facts. *Eur J Phys Rehabil Med* 2016;52:560–74.
- [89] Armand S, Bonnefoy-Mazure A, De Coulon G, Hoffmeyer P. Analyse quantifiée de la marche : mode d'emploi. *Rev Med Suisse* 2015;490:1916–20.
- [90] Deathe AB, Miller WC. The L test of functional mobility: measurement properties of a modified version of the timed “up & go” test designed for people with lower-limb amputations. *Phys Ther* 2005;85:626–35.
- [91] Kim JS, Chu DY, Jeon HS. Reliability and validity of the L test in participants with chronic stroke. *Physiotherapy* 2015;101:161–5. <https://doi.org/10.1016/j.physio.2014.09.003>.
- [92] Nguyen VC, Miller WC, Asano M, Wong RY. Measurement Properties of the L Test for Gait in Hospitalized Elderly. *Am J Phys Med Rehabil* 2007;86:463–8. <https://doi.org/10.1097/PHM.0b013e31805b8193>.
- [93] Rushton PW, Miller WC, Deathe AB. Minimal clinically important difference of the L Test for individuals with lower limb amputation: A pilot study. *Prosthet Orthot Int* 2015;39:470–6. <https://doi.org/10.1177/0309364614545418>.

- [94] Luthi F, Praz C, Léger B, Vouilloz A, Favre C, Loiret I, et al. Cross-cultural adaptation and measurement properties of the French version of the Trinity Amputation and Prosthesis Experience Scales—Revised (TAPES-R). *PLOS ONE* 2020;15:e0229084. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229084>.
- [95] Joussain C, Laroche D, Casillas J-M, Paysant J, Ader P, Bastable P, et al. Transcultural validation of the SIGAM mobility grades in French: The SIGAM-Fr. *Ann Phys Rehabil Med* 2015;58:161–6. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2015.02.003>.
- [96] Ryall N, Eyres S, Neumann V, Bhakta B, Tennant A. The SIGAM mobility grades: a new population-specific measure for lower limb amputees. *Disabil Rehabil* 2003;25:833–44. <https://doi.org/10.1080/0963828021000056460>.
- [97] Gaunaurd I, Kristal A, Horn A, Krueger C, Muro O, Rosenberg A, et al. The Utility of the 2-Minute Walk Test as a Measure of Mobility in People With Lower Limb Amputation. *Arch Phys Med Rehabil* 2020;101:1183–9. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2020.03.007>.
- [98] Kim J-S, Oh D-W, Kim S-Y, Choi J-D. Visual and kinesthetic locomotor imagery training integrated with auditory step rhythm for walking performance of patients with chronic stroke. *Clin Rehabil* 2011;25:134–45. <https://doi.org/10.1177/0269215510380822>.
- [99] Rulleau T, Toussaint L. L'imagerie motrice en rééducation. *Kinésithérapie Rev* 2014;14:51–4. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2013.12.015>.
- [100] Gueugneau N, Mauvieux B, Papaxanthis C. Circadian modulation of mentally simulated motor actions: implications for the potential use of motor imagery in rehabilitation. *Neurorehabil Neural Repair* 2009;23:237–45. <https://doi.org/10.1177/1545968308321775>.
- [101] Relaxation neuromusculaire : Bienfaits | Institut de Kinésithérapie | Paris. *Inst Kinésithérapie* 2020. <https://www.institut-kinesitherapie.paris/actualites/la-relaxation-neuromusculaire-pour-quoi-et-pour-qui/> (accessed September 13, 2024).
- [102] Benson H, Greenwood MM, Klemchuk H. The relaxation response: psychophysiologic aspects and clinical applications. *Int J Psychiatry Med* 1975;6:87–98. <https://doi.org/10.2190/376W-E4MT-QM6Q-H0UM>.
- [103] La relaxation progressive de Jacobson, Chaloult, Goulet et Ngô. Lien : <https://tccmontreal.com/wp-content/uploads/2016/03/la-relaxation-progressive-de-jacobson.pdf> n.d.
- [104] Hanakawa T, Immisch I, Toma K, Dimyan MA, Van Gelderen P, Hallett M. Functional properties of brain areas associated with motor execution and imagery. *J Neurophysiol* 2003;89:989–1002. <https://doi.org/10.1152/jn.00132.2002>.
- [105] Maclver K, Lloyd DM, Kelly S, Roberts N, Nurmikko T. Phantom limb pain, cortical reorganization and the therapeutic effect of mental imagery. *Brain* 2008;131:2181–91. <https://doi.org/10.1093/brain/awn124>.
- [106] Tamir R, Dickstein R, Huberman M. Integration of Motor Imagery and Physical Practice in Group Treatment Applied to Subjects With Parkinson's Disease. *Neurorehabil Neural Repair* 2007;21:68–75. <https://doi.org/10.1177/1545968306292608>.
- [107] Gil-Bermejo-Bernardez-Zerpa A, Moral-Munoz JA, Lucena-Anton D, Luque-Moreno C. Effectiveness of Motor Imagery on Motor Recovery in Patients with Multiple Sclerosis: Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18:498. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020498>.

- [108] Saruco E, Guillot A, Saimpont A, Di Rienzo F, Durand A, Mercier C, et al. Motor imagery ability of patients with lower-limb amputation: exploring the course of rehabilitation effects. *Eur J Phys Rehabil Med* 2019;55:634–45. <https://doi.org/10.23736/S1973-9087.17.04776-1>.
- [109] Saimpont A, Malouin F, Durand A, Mercier C, Di Rienzo F, Saruco E, et al. The effects of body position and actual execution on motor imagery of locomotor tasks in people with a lower-limb amputation. *Sci Rep* 2021;11:13788. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93240-6>.
- [110] Mayer A, Kudar K, Bretz K, Tihanyi J. Body schema and body awareness of amputees. *Prosthet Orthot Int* 2008;32:363–82. <https://doi.org/10.1080/03093640802024971>.
- [111] Deathe AB, Wolfe DL, Devlin M, Hebert JS, Miller WC, Pallaveshi L. Selection of outcome measures in lower extremity amputation rehabilitation: ICF activities. *Disabil Rehabil* 2009;31:1455–73. <https://doi.org/10.1080/09638280802639491>.
- [112] Melcer T, Walker GJ, Galarneau M, Belnap B, Konoske P. Midterm Health and Personnel Outcomes of Recent Combat Amputees. *Mil Med* 2010;175:147–54. <https://doi.org/10.7205/MILMED-D-09-00120>.
- [113] Jo S-H, Kang S-H, Seo W-S, Koo B-H, Kim H-G, Yun S-H. Psychiatric understanding and treatment of patients with amputations. *Yeungnam Univ J Med* 2021;38:194–201. <https://doi.org/10.12701/yujm.2021.00990>.
- [114] Heeren A, Coussement C, Colon É. La stimulation transcrânienne à courant continu en psychiatrie - Vers de nouvelles perspectives d'interventions. *médecine/sciences* 2016;32:752–7. <https://doi.org/10.1051/medsci/20163208024>.
- [115] Foerster A, Rocha S, Wiesiolek C, Chagas AP, Machado G, Silva E, et al. Site-specific effects of mental practice combined with transcranial direct current stimulation on motor learning. *Eur J Neurosci* 2013;37:786–94. <https://doi.org/10.1111/ejn.12079>.
- [116] Kashoo FZ, Al-Baradie RS, Alzahrani M, Alanazi A, Manzar MD, Gugnani A, et al. Effect of Transcranial Direct Current Stimulation Augmented with Motor Imagery and Upper-Limb Functional Training for Upper-Limb Stroke Rehabilitation: A Prospective Randomized Controlled Trial. *Int J Environ Res Public Health* 2022;19:15199. <https://doi.org/10.3390/ijerph192215199>.

Annexes

Annexe n°1 :

Questionnaire TAPES-R-F

Ce questionnaire a pour but de mesurer la façon dont vous vous êtes adapté à votre amputation, l'influence de l'amputation sur vos activités quotidiennes ainsi que votre degré de satisfaction avec votre prothèse. Ce n'est pas un test, il n'y a pas de réponse juste ou fausse. Merci de répondre aussi précisément que vous le pouvez à chacune de ces questions, en cochant la case qui correspond le mieux à ce que vous pensez :

Adaptation psycho-sociale	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	D'accord	Totalement d'accord
1. Je me suis adapté à mon amputation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Avec le temps qui passe, j'accepte mieux ma prothèse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. J'ai le sentiment d'avoir réussi à gérer ce traumatisme dans ma vie.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Même si j'ai une prothèse, ma vie est bien remplie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Je me suis habitué à porter une prothèse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Ça m'est égal si quelqu'un regarde ma prothèse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Je parle facilement de ma prothèse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Ça ne me dérange pas si quelqu'un me pose des questions sur ma prothèse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. Je parle facilement avec les autres de mon membre perdu	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

10. Ça m'est égal si quelqu'un remarque que je boite	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11. Une prothèse limite mes capacités à faire mon travail	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12. Avoir une prothèse me rend plus dépendant des autres que ce que je voudrais	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13. Avoir une prothèse limite le genre de travail que je peux faire	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14. Être amputé signifie que je ne peux pas faire ce que je veux faire	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15. Avoir une prothèse limite la quantité de travail que je peux faire	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Limitation des activités	Oui, très limité	Un peu limité	Non, pas du tout limité
a. Des activités énergiques telles que courir, soulever des objets lourds, pratiquer des sports exigeants physiquement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b. Monter plusieurs étages	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c. Courir pour attraper un bus	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d. Sports et loisirs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e. Monter un étage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

f. Marcher plus d'1 km	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g. Marcher 500 m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h. Marcher 100 m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
i. Pratiquer mes passe-temps	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
j. Travailler	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Satisfaction avec la prothèse	Insatisfait	Satisfait	Très satisfait
i. Couleur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ii. Forme	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
iii. Apparence	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
iv. Poids	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
v. Utilité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
vi. Fiabilité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
vii. Ajustement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
viii. Confort	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Merci de mettre une croix dans la case qui décrit le mieux votre degré de satisfaction avec votre prothèse



Annexe n°2 :

SIGAM-Fr mobility grades questionnaire

Ce questionnaire vous interroge sur la façon dont vous vous déplacez habituellement, en utilisant une aide à la marche si nécessaire.

Cochez, s'il vous plait la case OUI ou NON qui correspond le mieux à votre situation, après chaque question.

OUI NON

1. Portez-vous votre prothèse(s) ?
2. Portez-vous votre prothèse(s) pour des raisons **uniquement** esthétiques c.a.d. que vous ne **marchez pas** avec ?
3. Portez-vous votre prothèse(s) pour vous aider à vous déplacer sur de très courtes distances. (par exemple : vous déplacer du lit à un fauteuil ou d'un fauteuil aux toilettes ?)
- 4a. Avez-vous des soins infirmiers en ce moment ?

Si « OUI » continuez Si « NON » passez à la question 5a

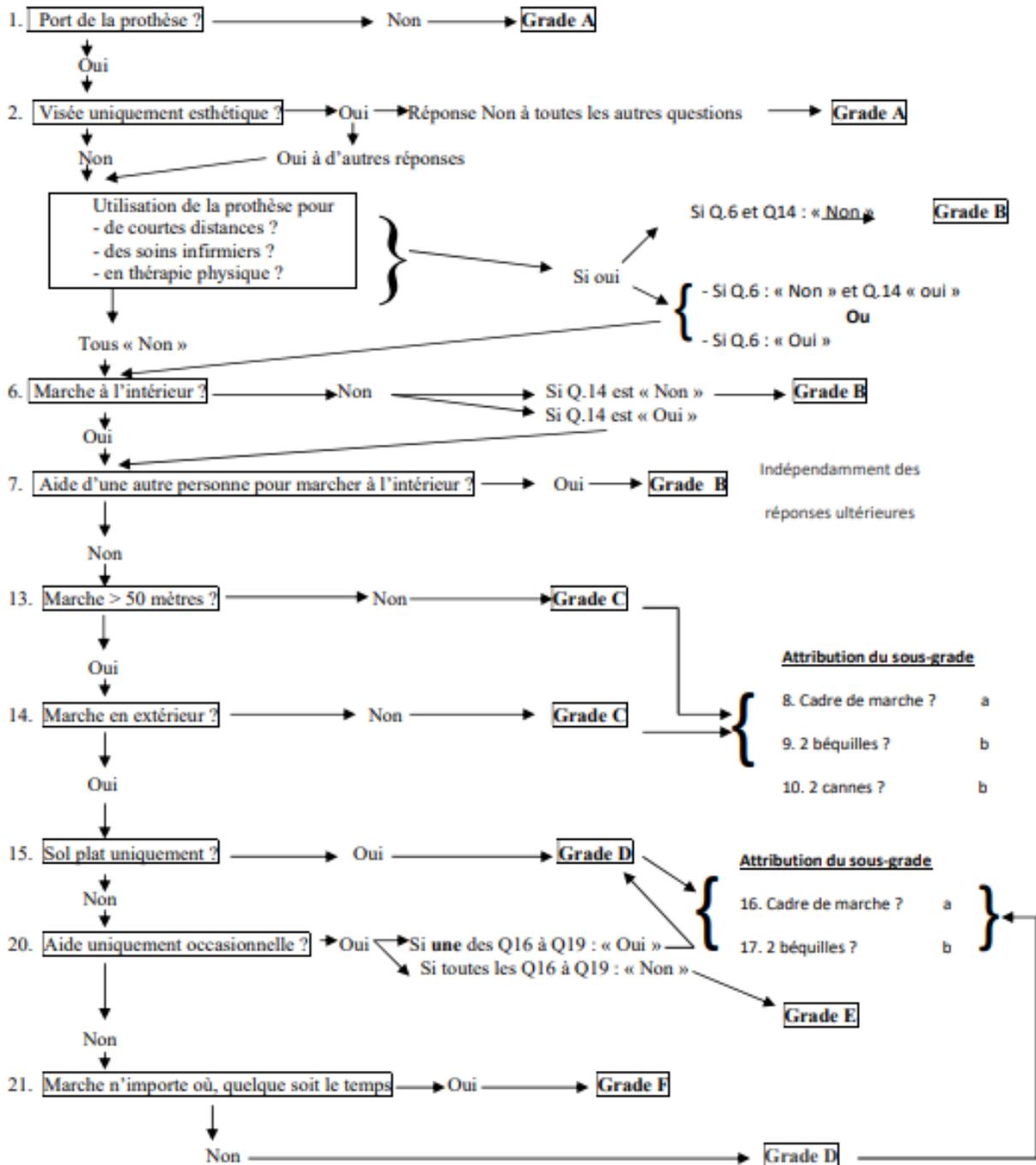
- 4b. Portez-vous votre prothèse(s) pour vous aider lors de ses soins infirmiers ?
- 5a. Avez-vous de la kinésithérapie, ou de l'ergothérapie en ce moment ?

Si « OUI » continuez Si « NON » passez à la question 6

- 5b. Portez-vous votre prothèse(s) pour vous aider lors de la rééducation ?
6. Marchez-vous habituellement à l'intérieur, avec votre prothèse(s) ?
7. Avez-vous, habituellement, besoin de l'aide de quelqu'un pour marcher à l'intérieur avec votre prothèse(s) ?
8. Avez-vous, habituellement, besoin d'un déambulateur pour marcher à l'intérieur avec votre prothèse(s) ?
9. Avez-vous, habituellement, besoin de 2 béquilles pour marcher à l'intérieur avec votre prothèse(s) ?

10. Avez-vous, habituellement, besoin de 2 cannes pour marcher à l'intérieur avec votre prothèse(s) ?
11. Avez-vous, habituellement, besoin d'une béquille ou d'une canne pour marcher à l'intérieur avec votre prothèse(s) ?
12. Pouvez vous marcher à l'intérieur avec votre prothèse(s) sans aucune aide ?
13. Habituellement, arrivez vous à marcher plus de 50 mètres sans vous arrêter ?
14. Marchez-vous, habituellement, à l'extérieur avec votre prothèse(s) ?
15. Habituellement, marchez-vous uniquement sur terrain plat ?
16. A l'extérieur, lorsque vous portez votre prothèse(s), avez-vous, habituellement, besoin d'un déambulateur pour marcher ?
17. A l'extérieur, lorsque vous portez votre prothèse(s), avez-vous, habituellement, besoin de 2 béquilles pour marcher ?
18. A l'extérieur, lorsque vous portez votre prothèse(s), avez-vous, habituellement, besoin de 2 cannes pour marcher ?
19. A l'extérieur, lorsque vous portez votre prothèse(s), avez-vous, habituellement, besoin d'une béquille ou d'une canne pour marcher ?
20. A l'extérieur, utilisez vous seulement occasionnellement une aide pour marcher, pour être plus en confiance, quand la météo est mauvaise ou que le terrain est irrégulier ?
21. A l'extérieur, quand vous portez votre prothèse(s), marchez vous partout , quelque soit la météo, sans aucune aide ?

SIGAM-Fr algorithm



SIGAM-Fr mobility grades

A : Port de la prothèse de membre inférieur abandonnée ou utilisation uniquement à visée esthétique.

B : Utilisation thérapeutique avec port de la prothèse uniquement pour les transferts, pour aider les infirmiers, pour marcher avec l'aide du kinésithérapeute ou d'une autre personne, ou au cours de la rééducation.

C : Marche uniquement sur un sol plat <50 mètres, avec ou sans l'utilisation d'aides à la marche: a = un cadre de marche (déambulateur), b = 2 béquilles / 2 cannes, c = 1 béquille / 1 canne, d = pas de canne ou de béquille.

D : Marche en extérieur sur un terrain plat et avec de bonnes conditions climatiques, plus de 50 mètres, avec utilisation d'aides à la marche: a= un cadre de marche (déambulateur), b = 2 béquilles /2 cannes, c = 1 béquille / 1 canne.

E : Marche de plus de 50 mètres. Sans aide à la marche sauf exceptionnellement pour augmenter l'assurance du patient en situations de sol accidenté, ou face à de mauvaises conditions climatiques.

F : Marche normale ou quasi normale

Annexe n°3 :

Note d'information destinée au patient

Titre de la recherche : Intérêt de l'imagerie motrice dans la rééducation de la marche chez la personne amputée trans-tibiale d'origine vasculaire, une étude contrôlée et randomisée

Etude IMAMPUTE

*Il vous est demandé de lire attentivement cette note d'information avant de prendre votre décision.
Demandez au médecin de vous expliquer tout ce que vous n'avez pas pu comprendre.
Conservez cette note d'information, elle fait foi de votre participation à cette recherche.*

Madame, Monsieur,

Vous êtes invité à participer à une étude de recherche clinique visant à évaluer l'efficacité de l'imagerie motrice dans la rééducation de la marche chez les personnes amputées trans-tibiales d'origine vasculaire. Avant de prendre une décision, nous vous demandons de lire attentivement les informations ci-dessous et de poser toutes les questions que vous pourriez avoir.

1) Pourquoi me propose-t-on cette étude ?

Cette étude entre dans le cadre d'une thèse pour l'obtention de mon diplôme de docteur en médecine physique et réadaptation. Cette dernière est réalisée dans le centre de réadaptation des Hautois grâce au Dr RIMETZ qui se retrouve être mon directeur de thèse.

2) Quel est l'objectif de cette étude ?

L'objectif principal de cette étude est de déterminer si l'intégration de l'imagerie motrice dans un programme de rééducation peut améliorer la marche et la qualité de vie des personnes amputées trans-tibiales d'origine vasculaire.

3) Qu'est-ce que l'imagerie motrice ?

Il s'agit d'une méthode de rééducation consistant simplement à s'imaginer réaliser des gestes avec précisions, sans produire un quelconque mouvement réel. De précédentes études ont montré une similitude d'activation des zones du cerveau lors de l'imagerie motrice et de la réalisation du mouvement. Elle jouerait un rôle dans le perfectionnement de mouvement, dans ce contexte elle se retrouve notamment souvent utilisée chez les sportifs de haut niveau.

Son utilisation dans le domaine de la rééducation émerge depuis quelques années, avec des résultats intéressants concernant par exemple les patients aux antécédents d'AVC, la gestion des douleurs dans le cadre de l'algoneurodystrophie ou également dans une moindre mesure chez les patients atteints de la maladie de Parkinson.

Elle permettrait potentiellement d'améliorer la marche dans votre situation, sans apporter d'effort physique supplémentaire, de plus il s'agit d'une technique pouvant par la suite être réalisée en autonomie sans matériel particulier.

Cependant, à l'heure actuelle, peu d'études ont été réalisées chez la personne amputée. Dans ce contexte émerge l'idée de cette étude afin de rechercher un éventuel bénéfice dans votre situation.

4) Quelles en sont les modalités ? Comment va-t-elle se dérouler ?

Il s'agit d'une étude :

- interventionnelle (ajout d'une méthode de rééducation à un protocole de rééducation existant déjà),
- prospective (recueil de données sur une période de temps définie),
- randomisée (les participants seront répartis de manière aléatoire dans différents groupes de traitement).

Dès lors que votre consentement est donné, des tests de faisabilité d'imagerie motrice seront effectués afin de savoir si vous êtes capable de l'utiliser et d'en obtenir un éventuel bénéfice. En cas de succès, vous serez répartie dans l'un des 2 groupes de façon aléatoire :

- Groupe expérimental avec inclusion de l'imagerie motrice au protocole standard de rééducation.
- Groupe contrôle avec inclusion de séances de simulation mentale non liée au travail de la marche (séances de relaxation pleine conscience selon Jacobson). La relaxation peut déjà faire partie d'un protocole de rééducation dans votre situation, il ne s'agit donc pas d'une perte de chance.

Ces séances viendront donc compléter votre programme de rééducation. Elles seront au nombre de 3 séances par semaine, pour une durée de 20 minutes chacune.

Dès lors que vous êtes capable de porter votre prothèse et de marcher en dehors des barres parallèles plus de 10min, les tests spécifiquement évalués dans le cadre de cette étude seront réalisés, puis une nouvelle phase de tests sera de nouveau réalisée à 4 semaines, puis 6 semaines après votre sortie au moment de la consultation de suivi habituelle.

Il est important de noter que ces tests ou questionnaires sont déjà réalisés dans le centre en dehors de cette étude, car ils permettent de suivre votre évolution et votre progression de façon concrète et objective.

5) **Quels sont les bénéfices et les risques potentiels à la participation de cette recherche ?**

Les avantages potentiels comprennent une amélioration de la marche, de la stabilité et de la qualité de vie.

Les risques associés à votre participation à cette étude sont minimes et comprennent des inconforts mineurs lors des évaluations cliniques (pour rappel, ils font pour la plupart déjà partie du programme de rééducation en dehors de cette étude). Nous pouvons également relever que l'utilisation de l'imagerie mentale peut être fatigante car elle requiert de la concentration, nos psychomotriciennes s'adapteront autant que faire se peut à votre état de forme.

6) **Que se passera-t-il à la fin de ma participation à cette étude ?**

A l'issue de cette recherche, les résultats globaux pourront vous être transmis par mail si vous le souhaitez. En effet, s'il s'avère que l'imagerie motrice apporte bel et bien un bénéfice sur la rééducation à la marche, nous proposerons au groupe contrôle de l'adopter afin de poursuivre leur progression.

7) **Quels sont mes droits en tant que participant à cette étude ?**

Vous êtes libre d'accepter ou de refuser de participer à cette recherche sans avoir à vous justifier et **sans que cela ne modifie la relation de soin** existant avec l'équipe médicale et paramédicale qui vous suit.

En cas d'acceptation, **vous pourrez à tout moment revenir sur votre décision**, sans nous en préciser la raison, et sans que cela n'altère la qualité des soins qui vous sont dispensés.

Par ailleurs, vous pourrez obtenir à l'issue de la recherche la communication des résultats.

Dans le cadre de la recherche, un traitement de vos données personnelles sera mis en œuvre en version papier pour permettre d'analyser les résultats de l'étude au regard de l'objectif de cette dernière qui

vous a été présenté. A cette fin, les données médicales vous concernant ou tout autre type de données existantes seront transmises au Promoteur et aux investigateurs : Centre de rééducation les Hautois de Oignies

Conformément aux dispositions de la loi modifiée relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés et au règlement européen sur la protection des données personnelles (2016/679), vous disposez des droits suivants :

Droit d'accès

Vous pouvez à tout moment obtenir au cours ou à l'issue de la recherche, communication de vos données de santé détenues par votre médecin (article 12 RGPD).

Droit à l'information

Vous disposez d'un droit d'information sur les données personnelles vous concernant collectées, traitées ou, le cas échéant, transmises à des tiers (article 15 RGPD).

Droit à la rectification

Vous avez le droit de demander la correction des données personnelles incorrectes vous concernant (articles 16 et 19 RGPD).

Droit d'effacement

Vous avez le droit de demander l'effacement des données personnelles vous concernant. Par exemple, si ces données ne sont plus nécessaires aux fins pour lesquelles elles ont été collectées (articles 17 et 19 de la RGPD).

Droit à la limitation du traitement

Sous certaines conditions, vous avez le droit de demander une limitation du traitement. Dans ce cas, vos données pourront uniquement être stockées mais pas utilisées dans le cadre du traitement, sauf avec votre consentement exprès (articles 18 et 19 RGPD).

Droit à la portabilité des données

Vous avez le droit de recevoir les données personnelles qui ont été fournies à la personne responsable de l'essai clinique. Vous pouvez ensuite demander que ces données vous soient transmises ou, si cela est techniquement possible, qu'elles soient transmises à un autre organisme de votre choix (Article 20 GDPR).

Droit d'opposition

Vous avez le droit de vous opposer à tout moment au traitement de vos données personnelles (article 21 RGPD). Le traitement est alors arrêté par le promoteur, sauf motifs légitimes et impérieux, ou pour la constatation, l'exercice ou la défense de droits en justice. Cependant et conformément à la réglementation, si vous devez vous retirer de l'étude, les données recueillies avant votre retrait pourront encore être traitées avec les autres données recueillies dans le cadre de l'étude, si leur effacement compromet la réalisation des objectifs de l'étude.

Consentement au traitement des données personnelles et droit de révoquer ce consentement

Le traitement de vos données personnelles n'est autorisé qu'avec votre consentement (article 6 RGPD). Vous avez le droit de révoquer votre consentement au traitement des données personnelles à tout moment (article 7, paragraphe 3 RGPD).

Pour exercer l'un de ces droits, vous pouvez contacter le médecin investigateur de l'étude ou le promoteur.

Vous avez également le droit de déposer une plainte auprès de la Commission Nationale Informatique et Libertés (CNIL) si vous estimez que le traitement de vos données personnelles est réalisé en violation de vos droits.

A qui puis-je m'adresser en cas de problème ?

Vous pouvez poser toutes les questions que vous souhaitez, avant, pendant et après l'étude en vous adressant à :

Dr RIMETZ Alexandre
Service de Médecine Physique et Réadaptation
Centre de réadaptation les Hautois
9 Pl. de la 4ème République
62590 Oignies
Mail : arimetz@ahnac.com
Téléphone : 0321791010

Monsieur ESTERMANS Jordan
Interne de Médecine Physique et Réadaptation
Mail : jordan.esterms@gmail.com
Téléphone : 06.64.91.35.58

Annexe N°4 :

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT DESTINE AUX PATIENTS

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT ECLAIRE

Etude IMAMPUTE

Je certifie avoir lu et compris la lettre d'information concernant l'étude « **IMAMPUTE - Intérêt de l'imagerie motrice dans la rééducation de la marche chez la personne amputée trans-tibiale d'origine vasculaire, une étude contrôlée randomisée** » que m'a donné le Docteur.....

J'ai été informé(e) de l'objectif et du déroulement de l'étude, des bénéfices attendues ainsi que des risques potentiels.

J'ai également eu la possibilité de poser toutes les questions que je souhaite et j'ai eu le temps suffisant pour réfléchir.

Je suis pleinement conscient(e) que j'ai le droit de refuser de participer à cette recherche ou de retirer mon consentement à tout moment, sans subir de conséquences préjudiciables. Le fait de prendre cette décision n'affectera en aucun cas la qualité des soins futurs que je recevrai, et je bénéficierai toujours de la meilleure prise en charge rééducative possible, quel que soit mon choix.

Les données qui me concernent resteront strictement confidentielles. Je n'autorise leur consultation que par des personnes soumises au secret professionnel et collaborant à cette recherche. Je pourrai à tout moment demander toute information complémentaire auprès des médecins menant cette recherche.

J'accepte que les médecins investigateurs ainsi que les professionnels de santé me prenant en charge aient accès à mon dossier médical.

Mon consentement ne décharge en rien le médecin investigateur et le promoteur de l'ensemble de leurs responsabilités et je conserve tous mes droits garantis par la loi.

J'accepte que les données enregistrées à l'occasion de cette étude puissent faire l'objet d'un traitement informatisé, sous forme de données ne permettant pas de m'identifier, par le promoteur ou pour son compte.

J'ai bien noté que mon droit d'accès prévu par la loi informatique et liberté s'exerce à tout moment.

J'ai reçu un formulaire d'information détaillé. J'ai reçu une copie du présent document. J'ai été informé(e) qu'une copie sera également conservée par les organisateurs dans des conditions garantissant la confidentialité, et y consens.

Si je le souhaite et à ma demande, les résultats de l'essai me seront communiqués directement selon la loi du 4 mars 2002.

J'accepte de participer à l'étude IMAMPUTE, et par conséquent, que mes données soient recueillies et utilisées pour l'analyse des résultats de la recherche.

A compléter par le patient :

Je soussigné(e) Monsieur/Madame NOM : Prénom :
accepte de participer à cette étude de recherche clinique.

Je conserverai un exemplaire de la note d'information et du formulaire de consentement dûment signé
et complété.

Fait à :

Le / /

Signature :

A compléter par le médecin investigateur :

Je soussigné Dr NOM : Prénom :

déclare avoir recueilli le consentement de participation du patient à cette étude de recherche clinique.

Fait à :

Le / /

Signature :

Annexe n°5 :

Cahier d'observation

Intérêt de l'imagerie motrice dans la rééducation à la marche de la personne amputée trans-tibiale d'origine vasculaire

IMAMPUTE

Numéro d'identification du Participant :

Vérification des critères d'éligibilité :

Critères d'inclusion	Oui	Non
Patient âgé de 18 à 80 ans ;	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Patient ayant subi une amputation unilatérale trans-tibiale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
L'étiologie en cause de l'amputation est d'origine vasculaire (AOMI, diabète ...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Pour ces critères, si une seule case « **OUI** » ne peut être cochée, le participant N'EST PAS ELIGIBLE.

Critères de non inclusion	Oui	Non
Patient ayant déjà bénéficié d'une rééducation à la marche au préalable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Patient amputé bilatéral ou de membre supérieur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Patient ayant un déficit des membres inférieurs d'origine neuro-motrice (AVC séquellaire, SEP, Parkinson, myasthénie...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Contre-indication au test de marche de 2 minutes (angor instable, rétrécissement aortique serré, dyspnée stade 3 et 4 ...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Patient atteint de troubles cognitifs, ayant un score inférieur à 24/30 au MMSE	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Patient n'ayant pas réussi l'ensemble des tests de faisabilité d'utilisation de l'imagerie motrice	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Incapacité à lire et comprendre totalement le français	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Pour ces critères, si une seule case « **NON** » ne peut être cochée, le participant N'EST PAS ELIGIBLE.

Si tous les critères sont vérifiés, le participant peut être inclus dans l'étude.

INCLUSION – VISITE INITIALE

Date du recueil de la non opposition du patient : le/..../.....

Âge : ans

Sexe : masculin féminin

Poids (kg) :

Taille (cm) :

IMC (kg/m²) :

Côté de l'amputation : Dominant Non dominant

Longueur du moignon : cm

Antécédents médico-chirurgicaux du patient :

- | | |
|---|---|
| - | - |
| - | - |
| - | - |
| - | - |
| - | - |
| - | - |
| - | - |
| - | - |

Tabagisme :

- Actif (paquets/année :))
- Sevré (depuis))
- Non-fumeur

Alcoolisme :

- Actif (verres par jour :))
- Sevré (depuis))
- Aucune consommation d'alcool

Traitements au domicile du patient :

- | | |
|---|---|
| - | - |
| - | - |
| - | - |
| - | - |
| - | - |
| - | - |

MMSE : /30

Niveau d'activité physique avant la chirurgie d'amputation (IPAQ-SF) :

Faible

Moyen

Elevé

- Aide technique à la marche : Oui Non

o Si oui, laquelle :

MIF à l'entrée :/126

Temps depuis la chirurgie d'amputation (à l'entrée dans le service) : jours

Temps de la phase pré-prothétique (sortie des barres parallèles) : Jours

Complication(s) post opératoire :

Test d'effort réalisé : Oui Non

Si oui : Résultats :

Tests de faisabilité de l'imagerie motrice

Peu de temps après accord du patient et recueil de son consentement

1) MIQ-RS (Movement Imagery Questionnaire-Revised) :

- Score kinesthésique (de 1 à 7) :/49
- Score visuel (de 8 à 14) :/49

2) Chronométrie Mentale :

- TDMI (nombre de mouvement de steppage avec le moignon, en position assise :
 - o 15 secondes :
 - o 45 secondes :
 - o 25 secondes :
 - o Augmentation du nombre de répétition en fonction du temps : Oui Non
- Congruence temporelle (5 mouvements d'abduction du membre lésé, en position assise :
 - o Temps requis en mouvement imaginé (MI) :
 - o Temps requis de mouvement exécuté (ME) :
 - o Rapport MI/ME :
 - o Rapport situé entre 0.7 et 1.3 : Oui Non

Compte tenu du fait que l'investigateur a validé la procédure d'inclusion en :

- informant le patient (fiche d'information également donnée),
- s'assurant de la non opposition du patient ou du proche,
- vérifiant les critères d'inclusion et de non inclusion

la randomisation a pu être réalisée.

Le patient (N° d'identification) a été randomisé dans le bras :

EXPERIMENTAL (groupe imagerie motrice)

Ou

CONTRÔLE (groupe relaxation Jacobson)

T1 : 1^{ère} session de tests

Dès lors que le patient est capable de porter sa prothèse durant 1h et marcher en dehors des barres parallèles pendant au moins 2 minutes

Catégorie du pied prothétique :

Test de Marche de 2 Minutes :

- Distance parcourue (en mètres) : mètres
- Aide technique : Oui Non
 - o Si oui, laquelle :
- Nombre de pause :
- Symptômes rapportés par le patient :
- Echelle de Borg : ... /10
- Critère d'arrêt (si tel est le cas) :

L-Test :

- Temps de réalisation (en secondes)
 - o Essai n°1 : sec
 - o Essai n°2 : sec
 - o Essai n°3 : Sec*(Sélection du meilleur temps)*

Asymétrie de Longueur de Pas (en centimètre) :

- Longueur moyenne du pas, côté sain :
- Longueur moyenne du pas, côté prothétique :
- Rapport côté sain / côté prothétique :
- Pourcentage de l'asymétrie constatée : %

Asymétrie de Force d'Appuis :

- Moyenne de la force d'appuis côté sain :
- Moyenne de la force d'appuis côté prothétique :
- Rapport côté sain / côté prothétique :
- Pourcentage de l'asymétrie constatée : %

Vitesse de marche moyenne : m/sec

Evaluation de la douleur :

- EN moyenne de douleur du membre fantôme sur dernières 24h (sur une échelle de 0 à 10) :
...../100
- EN moyenne douleur en regard du membre résiduel :/100
- Traitements pour la douleur :

Echelle Visuelle Analogique (EVA) sur le ressenti général de leur performance de marche :/10

Observations cliniques et notes supplémentaires :

T2 : 2^{ème} session de tests

Après la durée d'intervention de 4 semaines

Catégorie du pied prothétique :

Test de Marche de 2 Minutes :

- Distance parcourue (en mètres) : mètres
- Aide technique : Oui Non
 - o Si oui, laquelle :
- Nombre de pause :
- Symptômes rapportés par le patient :
- Echelle de Borg : ... /10
- Critère d'arrêt (si tel est le cas) :

L-Test :

- Temps de réalisation (en secondes)
 - o Essai n°1 : sec
 - o Essai n°2 : sec
 - o Essai n°3 : Sec(Sélection du meilleur temps)

Asymétrie de Longueur de Pas (en centimètre) :

- Longueur moyenne du pas, côté sain :
- Longueur moyenne du pas, côté prothétique :
- Rapport côté sain / côté prothétique :
- Pourcentage de l'asymétrie constatée : %

Asymétrie de Force d'Appuis :

- Moyenne de la force d'appuis côté sain :
- Moyenne de la force d'appuis côté prothétique :
- Rapport côté sain / côté prothétique :
- Pourcentage de l'asymétrie constatée : %

Vitesse de marche moyenne : m/sec

Questionnaire TAPES-R (Texas Assessment of Performance for Electronic Communication) :

- Score global :
 - o Adaptation psycho-sociale (moyenne) :/4
 - o Limitation d'activité (moyenne) :/3
 - o Satisfaction avec la prothèse (moyenne) :/3
 - o Niveau de satisfaction générale avec la prothèse :/10

Evaluation de la douleur :

- EN moyenne de douleur du membre fantôme sur dernières 24h (sur une échelle de 0 à 10) :/100
- EN moyenne douleur en regard du membre résiduel :/100
- Traitements pour la douleur :

Echelle Visuelle Analogique (EVA) sur le ressenti général de leur performance de marche :/10

Observations cliniques et notes supplémentaires :

T3 : 3^{ème} session de tests

Catégorie du pied prothétique :

Test de Marche de 2 Minutes :

- Distance parcourue (en mètres) : mètres
- Aide technique : Oui Non
 - o Si oui, laquelle :
- Nombre de pause :
- Symptômes rapportés par le patient :
- Echelle de Borg : ... /10
- Critère d'arrêt (si tel est le cas) :

L-Test :

- Temps de réalisation (en secondes)
 - o Essai n°1 : sec
 - o Essai n°2 : sec
 - o Essai n°3 : Sec*(Sélection du meilleur temps)*

Asymétrie de Longueur de Pas (en centimètre) :

- Longueur moyenne du pas, côté sain :
- Longueur moyenne du pas, côté prothétique :
- Rapport côté sain / côté prothétique :
- Pourcentage de l'asymétrie constatée : %

Asymétrie de Force d'Appuis :

- Moyenne de la force d'appuis côté sain :
- Moyenne de la force d'appuis côté prothétique :
- Rapport côté sain / côté prothétique :
- Pourcentage de l'asymétrie constatée : %

Vitesse de marche moyenne : m/sec

Questionnaire TAPES-R (Texas Assessment of Performance for Electronic Communication) :

- Score global :
 - o Adaptation psycho-sociale (moyenne) :/4
 - o Limitation d'activité (moyenne) :/3
 - o Satisfaction avec la prothèse (moyenne) :/3

- Niveau de satisfaction générale avec la prothèse : .../10

Questionnaire SIGAM :

- Grade : A B C D E F

Evaluation de la douleur :

- EN moyenne de douleur du membre fantôme sur dernières 24h (sur une échelle de 0 à 10) : .../100
- EN moyenne douleur en regard du membre résiduel : .../100
- Traitements pour la douleur :

Echelle Visuelle Analogique (EVA) sur le ressenti général de leur performance de marche : .../10

Observations cliniques et notes supplémentaires :

Annexe n°6 :

**Le protocole complet, repris des travaux de Chaloult, Goulet et Ngô [103],
médecins psychiatres à Montréal**

INSTRUCTIONS PRÉALABLES À L'APPRENTISSAGE DE LA RELAXATION PROGRESSIVE DE JACOBSON

1. Les exercices de relaxation doivent être pratiqués pendant vingt minutes environ au rythme de une à deux fois par jour, soit le matin avant le déjeuner, après s'être habillé pour bien s'éveiller, et/ou en fin de journée.
2. Éviter le plus possible de s'entraîner après les repas ou après avoir pris un stimulant (caféine) ou de l'alcool.
3. S'installer seul(e), dans une pièce calme, bien aérée, fraîche, semi-obscur et isolée le plus possible des bruits de la maison : téléphone, enfants, conjoint, visiteurs, etc.
4. S'étendre confortablement sur le dos, sur un lit ou un sofa, la tête supportée par un oreiller de son choix, les bras allongés le long du corps et repliés, la paume des mains retournée vers le sol, les jambes allongées, les talons écartés de quelques pouces et les pieds légèrement tournés vers l'extérieur. On peut aussi utiliser un bon fauteuil confortable.
5. Détacher tout vêtement trop serré au niveau de la taille, du thorax et du cou.
6. Les distractions en cours de pratique sont normales et fréquentes surtout dans les débuts. Lorsqu'elles surviennent, ramener doucement son attention sur l'exercice en cours sans s'impatienter et sans faire d'effort.
7. Pour chaque exercice, il est important de contracter vigoureusement les muscles puis de les relâcher graduellement par la suite. N'allez toutefois pas au-delà de la sensation de malaise. S'il y a tremblement ou douleur, la contraction est inutilement exagérée.
8. Bien observer le vague malaise causé par la contraction, puis le confort apporté par la détente.
9. Pendant les périodes de détente, identifier soigneusement les zones de tension qui persistent et les faire disparaître de son mieux.

10. À la fin de chaque séance, prendre une profonde inspiration, ouvrir les yeux, étirer tous ses membres puis expirer. Avant de se lever, rester assis quelques secondes sur le bord du lit ou du sofa afin d'éviter les étourdissements.

11. Si un malaise ou une trop grande anxiété se manifestent, cesser la technique en cours, respirer profondément, ouvrir les yeux et contracter les membres. Si ces symptômes se répètent trop souvent, interrompre les pratiques et ne les reprendre qu'après en avoir discuté avec votre thérapeute.

TEXTE ET PAUSES DES DIVERSES PHASES DE LA RELAXATION PROGRESSIVE DE JACOBSON

1/ RELAXATION PROGRESSIVE DE JACOBSON PREMIÈRE PHASE : PHASE ACTIVE

Pour bien profiter de cette période de détente, installez-vous confortablement dans une pièce fraîche, semi-obscur et de préférence isolée des bruits de la maison. Détachez tout vêtement trop serré. Des distractions surviendront probablement à un moment ou l'autre au cours de l'exercice. Ramenez alors simplement votre attention sur la détente sans faire d'effort et sans penser à rien d'autre (pause de 3 secondes).

Les prochaines minutes n'appartiennent qu'à vous (pause de 10 secondes).

Maintenant que vous êtes installé confortablement, prenez une inspiration profonde en gonflant l'abdomen, puis en dilatant le thorax au maximum. Retenez votre inspiration quelques secondes (pause de 3 secondes), puis expirez lentement et à fond en ayant l'impression de vous laisser enfoncer dans le lit ou le fauteuil (pause de 10 secondes).

1. Prenez à nouveau une inspiration profonde en gonflant l'abdomen, puis en dilatant le thorax au maximum. Retenez votre inspiration quelques secondes (pause de 3 secondes), puis expirez lentement et à fond en imaginant que vos tensions s'éliminent en même temps que sort l'air de vos poumons (pause de 10 secondes).
2. Dirigez maintenant votre attention sur vos mains et vos avant-bras. Fermez vigoureusement vos deux poings. Serrez bien. Sentez la contraction dans les poings et les avant-bras. Continuez de respirer régulièrement pendant que vous serrez les poings (pause de 3 secondes). Relâchez. Détendez graduellement vos mains et vos avant-bras. Imaginez que vos mains et vos avant-bras deviennent lourds, relâchés et détendus. Sentez bien la différence entre le malaise de la tension et le confort de la détente (pause de 15 secondes).
3. Fermez à nouveau vos poings vigoureusement, puis pliez vos avant-bras sur vos bras en contractant les biceps comme pour soulever un poids très lourd. Sentez la contraction dans vos poings, dans vos avant-bras et dans vos bras. Continuez de respirer doucement et régulièrement (pause de 2 secondes). Relâchez et sentez bien

- la détente dans vos mains, dans vos avant-bras et dans votre bras. Vos bras deviennent graduellement lourds, relâchés et détendus (pause de 15 secondes).
4. Enfoncez la paume de vos mains dans la surface où vous êtes couché et pressez fortement. Ressentez la tension à la partie supérieure des bras (pause de 3 secondes). Relâchez et sentez bien la tension qui disparaît de la partie supérieure de vos bras. Plus vous relâchez, plus vos bras deviennent à nouveau lourds et détendus, de plus en plus lourds et de plus en plus détendus (pause de 15 secondes).
 5. Ramenez maintenant votre pensée sur vos pieds et vos mollets. Pointez vos pieds et vos orteils vers le mur en face de vous. Contractez bien les muscles de vos pieds et de vos mollets et sentez la tension qui en résulte (pause de 3 secondes). Relâchez. Détendez. Détendez graduellement et aussi profondément que possible les muscles des pieds et des mollets (pause de 15 secondes).
 6. Pointez vos pieds et vos orteils en direction de votre visage. Concentrez votre attention sur les muscles que vous venez de contracter (pause de 3 secondes). Relâchez et détendez graduellement les muscles de vos jambes. Au fur et à mesure que la tension disparaît, vos jambes deviennent lourdes, de plus en plus lourdes (pause de 15 secondes).
 7. Enfoncez fortement vos talons et vos mollets dans la surface où vous êtes couché, tout en contractant énergiquement les muscles des cuisses et des fesses. Réalisez la tension provoquée par l'effort (pause de 3 secondes). Relâchez. Décontractez bien vos muscles. Sentez la tension disparaître graduellement (pause de 15 secondes).
 8. Rapprochez vos pieds puis soulevez-les légèrement au-dessus du matelas. Sentez la tension surtout au niveau des cuisses et du ventre. Continuez de bien respirer (pause de 2 secondes). Relâchez. Sentez bien maintenant la détente au niveau de vos jambes, et de votre ventre. Vos jambes deviennent lourdes, détendues et relâchées. De plus en plus lourdes, de plus en plus détendues, de plus en plus relâchées (pause de 5 secondes). Vos bras sont également lourds, détendus et relâchés. De plus en plus lourds, de plus en plus détendus et de plus en plus relâchés (pause de 10 secondes).
 9. Enfoncez les muscles de votre ventre comme pour en faire toucher la surface à votre colonne vertébrale. Enfoncez bien les muscles de votre ventre (pause de 5 secondes). Relâchez. Détendez bien tous les muscles de votre ventre. Laissez disparaître toute la tension (pause de 15 secondes).
 10. En gardant vos hanches et vos épaules bien en contact avec la surface où vous êtes couché, soulevez votre colonne vertébrale vers le haut de façon à former un petit pont

avec votre corps. Contractez bien tous les muscles de votre dos (pause de 5 secondes).

Relâchez, puis laissez les muscles de votre dos se détendre lentement, progressivement. Sentez la tension disparaître de votre dos (pause de 15 secondes).

11. Prenez une inspiration profonde en gonflant l'abdomen puis en dilatant le thorax au maximum (pause de 3 secondes). Puis retenez votre inspiration tout en contractant les muscles de votre thorax (pause de 3 secondes). Relâchez et expirez lentement en vidant complètement vos poumons. Laissez-vous aller de plus en plus profondément en ne pensant à rien d'autre qu'à l'agréable sensation que vous apporte la détente (pause de 10 secondes).
12. Élevez vos épaules en direction de votre tête, aussi haut que possible (pause de 3 secondes). Relâchez. Sentez bien la détente dans les muscles de vos épaules (pause de 15 secondes).
13. Élevez vos épaules en direction de votre tête puis croisez vos bras sur le thorax en tentant de joindre vos deux coudes. Contractez bien les muscles de vos épaules et de votre thorax (pause de 3 secondes). Relâchez. Laissez vos épaules descendre lentement et vos bras retomber de chaque côté de votre corps. Appréciez le soulagement au fur et à mesure que la tension se dissipe et que la détente s'installe. Vos épaules et vos bras sont maintenant de plus en plus relâchés et de plus en plus détendus (pause de 10 secondes).
14. Ramenez vos épaules vers votre dos lentement et fortement. Contractez bien les muscles du dos tout en bombant la poitrine (pause de 5 secondes). Relâchez. Laissez vos épaules revenir en place. Sentez la tension disparaître, s'échapper. Détendez de plus en plus vos muscles de vos épaules. Laissez-vous aller de plus en plus à la détente (pause de 10 secondes).
15. Tournez lentement la tête vers la droite aussi loin que vous en êtes capable tout en gardant les épaules bien en place. Contractez bien. Sentez la tension dans vos muscles (pause de 3 secondes). Relâchez. Ramenez la tête en place et noter le soulagement au fur et à mesure que la tension disparaît et que la détente s'installe (pause de 15 secondes).
16. Tournez lentement la tête vers la gauche aussi loin que vous en êtes capable. Contractez bien vos muscles (pause de 4 secondes). Relâchez. Ramenez la tête en place et détendez bien les muscles du cou et des épaules (pause de 15 secondes).
17. Fléchissez votre tête vers l'avant comme pour tenter de toucher votre poitrine avec votre menton. Contractez bien. Continuez de contracter (pause de 3 secondes). Relâchez.

Détendez bien vos muscles. Sentez la tension qui disparaît pour faire place à une détente profonde, de plus en plus profonde (pause de 15 secondes).

18. Fléchissez votre tête vers l'arrière comme pour former un demi-cercle avec votre cou. Contractez bien les muscles de la nuque (pause de 5 secondes). Relâchez et détendez graduellement les muscles de la nuque (pause de 5 secondes). Détendez également tous les muscles du cou et des épaules. Laissez reposer votre tête et sentez-la qui devient lourde, de plus en plus lourde. Les muscles de votre cou sont de plus en plus détendus et votre tête de plus en plus lourde (pause de 5 secondes). Si des tensions sont réapparues au niveau de vos bras, de vos jambes, de votre ventre, de votre thorax ou de vos épaules, faites-les à nouveau disparaître de votre mieux (pause de 10 secondes).

19. Passons maintenant aux muscles du visage. Commençons par le front. Tout en gardant vos yeux fermés, plissez énergiquement votre front en élevant les sourcils vers le haut.

Contractez bien (pause de 3 secondes). Relâchez. Laissez la tension s'échapper graduellement des muscles de votre front. Sentez votre front devenir lisse, détendu et dégagé (pause de 15 secondes).

20. Froncez énergiquement vos sourcils. Notez la tension au niveau de vos sourcils et entre les sourcils. Contractez bien (pause de 3 secondes). Relâchez et détendez les muscles de vos sourcils en même temps que ceux de votre front (pause de 15 secondes).

21. Fermez les yeux fortement en serrant les paupières. Contractez bien et sentez la tension dans vos paupières (pause de 3 secondes). Relâchez et notez la sensation de soulagement tout en continuant de détendre les muscles du front et des sourcils (pause de 15 secondes).

22. Formez un cercle avec vos lèvres comme pour prononcer exagérément la lettre O. Sentez la tension autour des lèvres. Contractez bien (pause de 3 secondes). Relâchez et laissez vos lèvres se détendre graduellement, de plus en plus (pause de 15 secondes).

23. Ouvrez la bouche aussi grande que possible. Notez bien la tension au niveau des lèvres, des joues et de la mâchoire. Ouvrez bien (pause de 3 secondes). Relâchez puis détendez graduellement les muscles des lèvres, des joues et de la mâchoire (pause de 15 secondes).

24. Poussez avec votre langue contre le palais et pressez fortement. Sentez bien la tension dans les muscles de la langue ainsi que ceux de la base de la langue (pause

- de 3 secondes). Relâchez. Sentez bien la détente qui s'installe dans les muscles de la langue ainsi que ceux de la base de la langue (pause de 15 secondes).
25. Montrez les dents comme pour faire un sourire forcé. Contractez énergiquement les muscles des joues. Contractez bien (pause de 3 secondes). Relâchez. Centrez votre attention sur les muscles des joues et détendez-les de votre mieux. Détendez-les profondément, de plus en plus profondément (pause de 10 secondes).
 26. Serrez les dents. Serrez bien. Maintenez la tension. Localisez l'endroit exact où elle se produit (pause de 3 secondes). Relâchez et laissez la tension disparaître lentement, graduellement. Détendez votre mâchoire jusqu'à ce qu'elle devienne complètement relâchée et décontractée. Sentez vos dents se desserrer et votre mâchoire tomber légèrement (pause de 10 secondes).
 27. Révisez maintenant mentalement vos différents groupes musculaires et observez jusqu'à quel point ils sont détendus. Dirigez votre pensée sur vos bras, ensuite sur vos jambes, puis votre ventre, votre dos, votre thorax, vos épaules, votre cou et finalement votre visage. Continuez de respirer lentement et régulièrement (pause de 5 secondes). Demandez-vous ce que vous ressentez maintenant comparé à ce que vous éprouviez au début de cette séance. Sentez bien la lourdeur au niveau de vos membres et de tout votre corps. Laissez-vous pénétrer par ces sensations de détente et de lourdeur (pause de 15 secondes).

Si vous le désirez, vous pouvez prolonger cette période de détente pendant quelques minutes. Lorsque vous vous lèverez, inspirez d'abord profondément, contractez graduellement tous vos membres, ouvrez vos yeux, puis expirez. Restez ensuite assis de 15 à 30 secondes sur le bord du lit ou du sofa afin d'éviter les étourdissements.

2/ RELAXATION PROGRESSIVE DE JACOBSON DEUXIÈME PHASE : PHASE DIFFÉRENTIELLE

Pour bien profiter de cette période de détente, installez-vous confortablement dans une pièce fraîche, semi-obscur et de préférence isolée des bruits de la maison. Étendez-vous sur un lit ou assoyez-vous dans un fauteuil confortable. Détachez tout vêtement trop serré. Des distractions surviendront probablement à un moment ou l'autre au cours de l'exercice. Ramenez alors simplement votre attention sur la détente sans faire d'effort et sans penser à rien d'autre (pause de 3 secondes).

Les prochaines minutes n'appartiennent qu'à vous (pause de 10 secondes).

Maintenant que vous êtes installé confortablement, prenez une inspiration profonde en gonflant l'abdomen, puis en dilatant le thorax au maximum. Retenez votre inspiration quelques secondes (pause de 3 secondes), puis expirez lentement et à fond en ayant l'impression de vous laisser enfoncer dans le lit ou le fauteuil (pause de 10 secondes).

Prenez à nouveau une inspiration profonde en gonflant l'abdomen, puis en dilatant le thorax au maximum. Retenez votre inspiration quelques secondes (pause de 3 secondes), puis expirez lentement et à fond en imaginant que vos tensions s'éliminent en même temps que sort l'air de vos poumons (pause de 10 secondes).

1. Exercice du bras droit

Fermez énergiquement votre poing droit et étirez tout votre bras droit en contractant bien les muscles de l'avant-bras, du bras et de l'épaule. Maintenez cette contraction mais tout en gardant les autres parties de votre corps bien détendues. Détendez votre bras gauche, vos jambes, votre ventre, votre épaule gauche, votre cou, votre mâchoire et tout votre visage. Respirez lentement et régulièrement. En même temps que vous notez la tension ressentie dans la main droite, le bras droit et l'épaule droite, identifiez et faites disparaître de votre mieux les autres zones de tension qui persistent ailleurs dans votre corps. Vérifiez à nouveau si votre bras gauche, vos jambes, votre ventre, votre épaule gauche et votre visage sont bien détendus (pause de 10 secondes). Relâchez maintenant la tension au niveau de la main droite, du bras droit et de l'épaule droite (pause de 5 secondes). Notez bien la différence entre la sensation de tension présente au niveau du bras droit eu moment où il était contracté et la sensation de détente que vous ressentez maintenant (pause de 5 secondes). Détendez bien vos bras, vos jambes, votre ventre, vos épaules et votre visage. Lorsque vos membres sont bien détendus, vous les sentez devenir lourds, de plus en plus lourds. Parfois vous pouvez même les sentir légèrement engourdis. Laissez-vous pénétrer par ces sensations de lourdeur et d'engourdissement (pause de 15 secondes).

2. Exercice du bras gauche

Fermez énergiquement votre poing gauche et étirez tout votre bras gauche en contractant bien les muscles de l'avant-bras, du bras et de l'épaule. Maintenez cette contraction mais tout en gardant les autres parties de votre corps bien détendues. Détendez votre bras gauche, vos jambes, votre ventre, votre épaule gauche, votre cou, votre mâchoire et tout votre visage. Respirez lentement et régulièrement. En même temps que vous notez la tension ressentie dans la main gauche, le bras gauche et l'épaule gauche, identifiez et faites disparaître de votre mieux les autres zones de tension qui persistent ailleurs dans votre corps. Vérifiez à nouveau si votre bras gauche, vos jambes, votre ventre, votre épaule gauche et votre visage sont bien détendus (pause de 10 secondes). Relâchez maintenant la tension au niveau de la main gauche, du bras gauche et de l'épaule gauche (pause de 5 secondes). Notez bien la différence entre la sensation de tension présente au niveau du bras gauche eu moment où il était contracté et la sensation de détente que vous ressentez maintenant (pause de 5 secondes). Détendez bien vos bras, vos jambes, votre ventre, vos épaules et votre visage. Lorsque vos membres sont bien détendus, vous les sentez devenir lourds, de plus en plus lourds. Laissez-vous pénétrer par cette agréable sensation de lourdeur (pause de 15 secondes).

3. Exercice de la jambe droite

Concentrez-vous maintenant sur votre jambe droite et contractez tous les muscles de votre jambe et de votre cuisse droites en les étirant vigoureusement (pause de 5 secondes). Gardez en même temps votre jambe gauche bien détendue. Détendez votre ventre, votre dos, vos épaules et votre cou. Vos bras demeurent lourds et détendus. Vos paupières, votre mâchoire et tout votre visage sont détendus. Votre respiration est lente et régulière (pause de 3 secondes). Actuellement seuls les muscles de votre jambe et de votre cuisse droites

sont tendus (pause de 10 secondes). Relâchez maintenant la tension de la jambe et de la cuisse droites (pause de 5 secondes). Continuez de respirer régulièrement et sans effort. Laissez-vous aller de plus en plus à la détente (pause de 15 secondes).

4. Exercice de la jambe gauche

Ramenez maintenant votre attention sur votre jambe gauche et contractez tous les muscles de votre jambe et de votre cuisse gauches en les étirant vigoureusement (pause de 5 secondes). Gardez en même temps votre jambe droite bien détendue. Détendez votre ventre, votre dos, vos épaules et votre cou. Vos bras demeurent lourds et détendus. Vos paupières, votre mâchoire et tout votre visage sont détendus. Votre respiration est lente et régulière (pause de 3 secondes). Actuellement seuls les muscles de votre jambe et de votre cuisse gauches sont tendus (pause de 10 secondes). Relâchez maintenant la tension de la jambe et de la cuisse gauches. Sentez bien la différence entre la tension et la détente au niveau des muscles de la jambe et de la cuisse gauches (pause de 5 secondes). Continuez de respirer régulièrement et sans effort. Sentez vos bras et vos jambes devenir graduellement lourds et détendus, de plus en plus lourds et de plus en plus détendus (pause de 15 secondes).

5. Exercice du bras gauche et de la jambe droite

Contractez cette fois votre bras gauche et votre jambe droite en les étirant vigoureusement (pause de 3 secondes). Gardez en même temps bien détendus les muscles de votre bras droit et ceux de votre jambe gauche (pause de 5 secondes). Détendez également tous les autres muscles de votre corps : ventre, dos, épaules, cou et visage. Continuez de respirer lentement et régulièrement (pause de 10 secondes). Relâchez maintenant la tension de votre bras gauche et de votre jambe droite (pause de 5 secondes). Sentez la tension disparaître de ces deux membres pour faire place à la détente. Continuez de détendre les muscles de vos membres et du reste de votre corps. Laissez-vous aller de plus en plus à la détente (pause de 15 secondes).

6. Exercice du bras droit et de la jambe gauche

Contractez maintenant votre bras droit et votre jambe gauche en les étirant vigoureusement (pause de 3 secondes). Gardez en même temps bien détendus les muscles de votre bras gauche et ceux de votre jambe droite (pause de 5 secondes). Détendez également tous les autres muscles de votre corps : ventre, dos, épaules, cou et visage. Continuez de respirer lentement et régulièrement (pause de 10 secondes). Relâchez maintenant la tension de votre bras droit et de votre jambe gauche (pause de 5 secondes). Sentez la tension disparaître de ces deux membres pour faire place à la détente. Continuez de détendre les muscles de vos membres et du reste de votre corps. Sentez vos membres ainsi que tout votre corps devenir lourds et détendus, de plus en plus lourds, de plus en plus détendus (pause de 15 secondes).

7. Exercice du dos

En gardant vos hanches et vos épaules bien en contact avec la surface où vous êtes couché, soulevez votre colonne vertébrale vers le haut de façon à former un petit pont avec votre corps (pause de 3 secondes). Sentez bien la tension au niveau des muscles de votre dos en même temps que vous détendez vos membres, votre ventre, votre thorax, votre cou

et votre visage. Respirez régulièrement et sans effort (pause de 5 secondes). Relâchez les muscles de votre dos. Détendez-les de votre mieux en même temps que tous les autres muscles de votre corps. Laissez-vous aller de plus en plus à la détente (pause de 15 secondes).

8. Exercice des épaules et du thorax

Vos bras et vos jambes sont détendus. Votre respiration est régulière et facile. Votre visage est également bien détendu (pause de 3 secondes). Élevez maintenant vos épaules en direction de votre tête puis croisez les bras sur le thorax en tentant de joindre vos deux coudes. Contractez bien les muscles de vos épaules et de votre thorax tout en gardant le reste de votre corps bien détendu (pause de 7 secondes). Relâchez et laissez vos épaules revenir en place. Sentez la tension disparaître de vos épaules et de votre thorax. Vos bras et vos jambes demeurent lourds et détendus. Votre ventre est détendu, votre dos est détendu, vos épaules sont détendues, votre cou est détendu, votre visage est détendu. Votre respiration est lente et régulière (pause de 15 secondes).

9. Exercice de la nuque

Fléchissez votre tête vers l'arrière comme pour former un demi-cercle avec votre cou (pause de 5 secondes). Gardez vos membres, votre ventre, vos épaules et votre visage bien détendus. Respirez lentement et régulièrement (pause de 5 secondes). Relâchez maintenant la tension de votre nuque et de votre cou (pause de 5 secondes). Continuez également de détendre vos membres, votre ventre, vos épaules, votre cou et votre visage. Sentez vos membres ainsi que tout votre corps devenir lourds et détendus, de plus en plus lourds, de plus en plus détendus (pause de 15 secondes).

10. Exercice du visage

Contractez tous les muscles de votre visage en fronçant vos sourcils, et en serrant vos paupières ainsi que vos dents (pause de 3 secondes). Détendez bien toutes les autres parties de votre corps : vos bras, vos jambes, votre ventre, vos épaules et votre cou (pause de 3 secondes). Respirez régulièrement (pause de 5 secondes). Relâchez et détendez maintenant tout votre visage : votre front, vos sourcils, vos paupières et votre mâchoire. Notez bien la différence entre le malaise de la tension et le confort de la détente (pause de 3 secondes). Continuez de détendre vos bras, vos jambes, votre ventre, vos épaules et votre cou. Détendez bien votre visage. Laissez-vous aller de plus en plus à la détente (pause de 15 secondes).

Avant la fin de cette séance de détente, repassez une dernière fois à tour de rôle les principaux muscles de votre corps et voyez jusqu'à quel point ils sont détendus. Laissez aller vos bras, vos jambes, votre ventre, votre dos, vos épaules, votre cou, votre nuque, votre front, vos sourcils, vos paupières et votre mâchoire. Détendez bien les muscles de votre visage (pause de 3 secondes). Respirez lentement et régulièrement (pause de 5 secondes). Sentez tout votre corps devenir lourd et détendu, de plus en plus lourd et de plus en plus détendu (pause de 15 secondes).

Si vous le désirez, vous pouvez prolonger cette période de détente pendant quelques minutes. Lorsque vous vous lèverez, inspirez d'abord profondément, contractez graduellement tous vos membres, ouvrez vos yeux, puis expirez. Restez ensuite assis de 15 à 30 secondes sur le bord du lit ou du sofa afin d'éviter les étourdissements.

3/ RELAXATION PROGRESSIVE DE JACOBSON TROISIÈME PHASE : PHASE ABRÉGÉE

Pour bien profiter de cette période de détente, installez-vous confortablement dans une pièce fraîche, semi-obscur et de préférence isolée des bruits de la maison. Étendez-vous sur un lit ou assoyez-vous dans un fauteuil confortable. Détachez tout vêtement trop serré. Des distractions surviendront probablement à un moment ou l'autre au cours de l'exercice. Ramenez alors simplement votre attention sur la détente sans faire d'effort et sans penser à rien d'autre (pause de 3 secondes).

Les prochaines minutes n'appartiennent qu'à vous (pause de 10 secondes).

1. Maintenant que vous êtes installé confortablement, prenez une inspiration profonde en gonflant l'abdomen, puis en dilatant le thorax au maximum. Retenez votre inspiration quelques secondes (pause de 3 secondes), puis expirez lentement et à fond en ayant l'impression de vous laisser enfoncer dans le lit ou le fauteuil (pause de 10 secondes).

2. Prenez à nouveau une inspiration profonde en gonflant l'abdomen, puis en dilatant le thorax au maximum. Retenez votre inspiration quelques secondes (pause de 3 secondes), puis expirez lentement et à fond en imaginant que vos tensions s'éliminent en même temps que sort l'air de vos poumons (pause de 10 secondes).

3. Dirigez maintenant votre attention sur vos mains et vos avant-bras. Fermez vigoureusement vos deux poings et pliez vos avant-bras sur vos bras. Enfoncez en même temps vos deux coudes dans la surface où vous êtes couché et pressez fortement (pause de 3 secondes). Ressentez bien la tension dans vos poings, dans vos avant-bras et dans vos bras. Détendez les autres muscles de votre corps. Respirez lentement et régulièrement (pause de 5 secondes). Relâchez. Sentez bien la tension qui disparaît de vos mains, de vos avant-bras et de vos bras. Plus vous relâchez, plus vos bras deviennent lourds et détendus. De plus en plus lourds, de plus en plus détendus (pause de 15 secondes).

4. Dirigez maintenant votre pensée vers vos pieds et vos jambes. Pointez vos pieds et vos orteils vers le mur en face de vous, puis enfoncez vos talons et vos mollets dans la surface où vous êtes couché tout en contractant énergiquement les muscles des cuisses et des fesses (pause de 3 secondes). Prenez bien conscience de la tension provoquée par l'effort. Détendez les autres muscles de votre corps. Respirez lentement et régulièrement (pause de 5 secondes). Relâchez. Sentez bien se détendre vos pieds, vos jambes, vos cuisses et vos fesses. Décontractez lentement et graduellement toute votre musculature (pause de 15 secondes).

5. Après avoir rapproché vos jambes, pointez vos orteils en direction de votre visage, puis soulevez vos pieds légèrement au-dessus du matelas (pause de 3 secondes). Sentez bien la tension à la partie antérieure des jambes et des cuisses ainsi qu'au niveau du ventre. Détendez les autres muscles de votre corps. Respirez régulièrement (pause de 5 secondes). Relâchez. Notez la tension qui disparaît de vos jambes, de vos cuisses et de votre ventre. Détendez vos muscles aussi complètement que possible (pause de 3 secondes). Sentez vos bras et vos jambes devenir lourds et détendus, de plus en plus lourds et de plus en plus détendus (pause de 15 secondes).

6. Prenez une inspiration en gonflant l'abdomen puis en dilatant au maximum votre thorax (pause de 4 secondes). Retenez votre respiration lentement en vidant complètement vos poumons. Détendez-vous de plus en plus profondément (pause de 5 secondes). Continuez de détendre vos bras, vos jambes et votre ventre tout en respirant lentement et régulièrement (pause de 15 secondes).

7. Relevez vos épaules en direction de votre tête puis croisez les bras sur le thorax en tentant de joindre vos deux coudes (pause de 2 secondes). Contractez vigoureusement tout en continuant de respirer régulièrement. Gardez le reste de votre corps détendu (pause de 5 secondes). Relâchez. Laissez vos épaules descendre lentement et vos bras retomber de chaque côté de votre corps. Notez la sensation de bien-être au fur et à mesure que la tension se dissipe et que la détente s'installe (pause de 15 secondes).

8. Froncez vos sourcils, serrez les paupières et serrez les dents tout en fléchissant votre tête vers l'avant comme pour toucher votre poitrine avec votre menton. Contractez bien ces muscles tout en détendant les autres parties de votre corps. Respirez régulièrement (pause de 3 secondes). Relâchez. Sentez bien la détente au niveau de vos sourcils, de vos paupières, de votre mâchoire et de votre cou. Continuez de détendre vos membres, votre ventre, vos épaules ainsi que le reste de votre corps. Sentez tout votre corps devenir lourd et détendu. De plus en plus lourd, de plus en plus détendu (pause de 15 secondes).

9. Tout en gardant vos yeux fermés, plissez énergiquement votre front en élevant les sourcils vers le haut, ouvrez la bouche aussi grande que possible et fléchissez votre tête vers l'arrière comme pour former un demi-cercle avec votre cou (pause de 3 secondes). Remarquez la tension dans les muscles de votre front, de votre bouche et de votre nuque. Détendez les autres muscles de votre corps. Respirez régulièrement (pause de 3 secondes). Relâchez. Détendez bien les muscles de votre corps (pause de 3 secondes).

Relâchez. Détendez bien les muscles de votre front, de votre bouche et de votre nuque. Sentez la tension diminuer lentement, graduellement (pause de 15 secondes).

Réviser maintenant en pensée vos différents groupes musculaires et observez jusqu'à quel point ils sont détendus (pause de 5 secondes).

1. Commencez par laisser aller les muscles de vos bras. Sentez vos bras devenir lourds et détendus, de plus en plus lourds et de plus en plus détendus (pause de 5 secondes). Vos bras sont maintenant tout à fait lourds et tout à fait détendus (pause de 10 secondes).
2. Puis laissez se détendre les muscles de vos pieds, de vos jambes et de vos cuisses (pause de 3 secondes). Sentez vos jambes devenir lourdes et détendues, de plus en plus lourdes et de plus en plus détendues (0ause de 5 secondes). Vos jambes sont maintenant tout à fait lourdes et tout à fait détendues (pause de 10 secondes).
3. Pendant que vos membres continuent de se détendre et de s'alourdir, prenez conscience des muscles de votre ventre, de votre bassin et de la partie inférieure de votre dos (pause de 3 secondes). Détendez graduellement les muscles de votre ventre, de votre bassin et de la partie inférieure de votre dos (pause de 5 secondes). Sentez votre ventre se relâcher et votre bassin ainsi que la partie inférieure de votre dos s'alourdir et s'enfoncer dans la surface sur laquelle vous êtes couché (pause de 3 secondes). Votre ventre, votre bassin et la partie inférieure de votre dos sont maintenant tout à fait relâchés et tout à fait détendus (pause de 10 secondes).
4. Passez maintenant à vos épaules et à la partie supérieure de votre dos. Laissez aller tous les muscles de vos épaules et de la partie supérieure de votre dos (pause de 3 secondes). Sentez vos épaules et la partie supérieure de votre dos se relâcher et devenir lourdes et détendues (pause de 10 secondes).
5. Ramenez votre pensée sur les muscles de votre nuque et de votre cou. Laissez aller tous les muscles de votre nuque et de votre cou (pause de 3 secondes). À mesure que se relâchent les muscles de votre nuque et de votre cou, sentez votre tête devenir lourde, pesante et s'enfoncer dans la surface où elle repose. Plus les muscles de votre cou se détendent, plus votre tête devient lourde et pesante, tout à fait lourde et tout à fait pesante (pause de 10 secondes).
6. Observez maintenant les muscles de votre visage. Prenez conscience des muscles de votre front, de vos sourcils, de vos paupières, de vos lèvres, de votre langue et de votre mâchoire. Détendez les muscles de votre front et sentez votre front devenir lisse et dégagé. Détendez ensuite vos sourcils et vos paupières. Sentez vos paupières devenir de plus en plus lourdes. Décontractez votre mâchoire et sentez vos dents qui se desserrent (pause de 3 secondes). Votre visage est maintenant bien

détendu : votre front est lisse, vos paupières sont lourdes et votre mâchoire est relâchée (pause de 10 secondes).

7. Vos bras et vos jambes sont lourds et détendus. Votre ventre est détendu. Votre bassin et la partie inférieure de votre dos sont lourds et détendus. Vos épaules et la partie supérieure de votre dos sont lourdes et détendues. Votre cou est souple, vos paupières sont lourdes et votre mâchoire est desserrée. Votre respiration est lente et régulière. Tout votre corps est lourd et détendu, tout à fait lourd et tout à fait détendu (pause de 10 secondes).

Si vous le désirez, vous pouvez prolonger cette période de détente pendant quelques minutes. Lorsque vous vous lèverez, inspirez d'abord profondément, contractez graduellement tous vos membres, ouvrez vos yeux puis restez ensuite assis de 15 à 30 secondes sur le bord du lit ou du sofa afin d'éviter les étourdissements.

4/ RELAXATION PROGRESSIVE DE JACOBSON QUATRIÈME PHASE : PHASE PASSIVE

Comme vous en avez maintenant l'habitude, prenez le temps au début de cette période de détente de vous installer dans une pièce fraîche, semi-obscur et isolée des bruits de la maison. Étendez-vous sur un lit ou assoyez-vous dans un fauteuil confortable. Détachez tout vêtement trop serré. Des distractions surviendront probablement à un moment ou l'autre au cours de l'exercice. Ramenez alors simplement votre attention sur la détente sans faire d'effort et sans penser à rien d'autre (pause de 3 secondes).

Les prochaines minutes n'appartiennent qu'à vous (pause de 10 secondes).

Tout en inspirant profondément, étirez bien vos membres et contractez les muscles de votre visage (pause de 3 secondes). Étirez-vous au maximum (pause de 5 secondes). Puis expirez lentement et à fond en relâchant tous vos muscles. Détendez le plus complètement possible toute votre musculature (pause de 10 secondes).

Prenez à nouveau une inspiration profonde en gonflant l'abdomen, puis en dilatant le thorax au maximum. Retenez votre inspiration quelques secondes (pause de 3 secondes), puis expirez lentement et à fond en imaginant que vos tensions s'éliminent en même temps que sort l'air de vos poumons (pause de 10 secondes).

Dirigez maintenant votre pensée sur vos mains, vos avant-bras et vos bras. Prenez conscience à tour de rôle de vos doigts, de vos mains, de vos poignets, de vos avant-bras, de vos coudes et de la partie supérieure de vos bras. Laissez aller tous les muscles de vos mains, de vos avant-bras et de la partie supérieure de vos bras (pause de 3 secondes). Plus vous les laissez aller, plus vous sentez vos bras devenir lourds et s'enfoncer un peu plus dans la surface où vous êtes couché. Vos bras sont lourds, chauds et détendus. Vous respirez régulièrement et sans effort (pause de 10 secondes).

Dirigez maintenant votre pensée vers vos pieds et vos jambes. À tour de rôle, prenez conscience de vos orteils, de vos pieds, de vos chevilles, de vos mollets, de vos genoux et de vos cuisses (pause de 3 secondes). Plus vous les laissez aller, plus vous sentez vos jambes devenir lourdes, de plus en plus lourdes. Vous les sentez s'enfoncer un peu plus

dans la surface où vous êtes couché. Vos bras sont lourds, chauds et détendus. Vos jambes sont lourdes, chaudes et détendues (pause de 10 secondes).

Pendant que vos membres continuent de se détendre et de s'alourdir, prenez maintenant conscience des muscles de votre ventre, de votre bassin et de la partie inférieure de vos dos. Laissez aller les muscles de votre ventre, de votre bassin et de la partie inférieure de vos dos (pause de 3 secondes). Au fur et à mesure que vos muscles se détendent, vous sentez votre ventre se relâcher et votre bassin et la partie inférieure de votre dos s'alourdir et pénétrer un peu plus dans la surface où vous êtes couché (pause de 3 secondes). Vos bras et vos jambes sont lourds, chauds et détendus. Votre ventre est chaud et détendu. Votre bassin et la partie inférieure de votre dos sont lourds, chauds et détendus (pause de 10 secondes).

Passons maintenant à vos épaules et à la partie supérieure de votre dos. Prenez bien conscience de tous les muscles de vos épaules ainsi que des muscles de la partie supérieure de votre dos. Laissez aller tous les muscles de vos épaules et de la partie supérieure de votre dos (pause de 3 secondes). Sentez vos épaules et la partie supérieure de votre dos se détendre et devenir lourdes. Sentez-les s'enfoncer un peu plus dans la surface où vous êtes couché (pause de 3 secondes). Tous vos membres sont maintenant lourds et chauds. Votre ventre est détendu et chaud, votre bassin et le bas de votre dos sont lourds et chauds, vos épaules et la partie supérieure de votre dos sont lourdes et chaudes, de plus en plus lourdes, de plus en plus chaudes (pause de 10 secondes).

Ramenez maintenant votre pensée sur les muscles de votre nuque et de votre cou. Laissez aller tous les muscles de votre nuque et de votre cou (pause de 3 secondes). Au fur et à mesure que se relâchent les muscles de votre nuque et de votre cou, sentez votre tête devenir lourde, pesante et s'enfoncer davantage dans la surface où elle repose. Plus les muscles de votre cou se détendent, plus votre tête devient lourde et pesante, de plus en plus lourde, de plus en plus pesante (pause de 10 secondes).

Passons maintenant aux muscles de votre visage. Prenez conscience des muscles de votre front, de vos sourcils, de vos yeux, de vos paupières, de vos lèvres, de vos joues, de votre langue et de votre mâchoire. Détendez les muscles de votre front et sentez votre front devenir plus lisse et plus dégagé. Détendez ensuite vos sourcils et vos paupières. Sentez vos paupières devenir lourdes, de plus en plus lourdes. Décontractez votre mâchoire et sentez vos dents qui se desserrent et votre mâchoire qui tombe légèrement (pause de 3 secondes). Votre visage est maintenant bien détendu : votre front est lisse et frais, vos paupières sont lourdes et votre mâchoire est relâchée (pause de 10 secondes).

Pendant que votre visage se détend, vos membres demeurent lourds, chauds et détendus. Votre bassin et le bas de votre dos sont lourds, chauds et détendus. Votre ventre est chaud et détendu. Vos épaules et la partie supérieure de votre dos sont lourdes, chaudes et détendues. Votre cou est souple et votre tête est lourde et pesante. Votre front est dégagé et frais, vos paupières sont lourdes et votre mâchoire est desserrée. Tout votre visage est détendu. Votre respiration est lente et régulière, tout votre corps est lourd et détendu, de plus en plus lourd, de plus en plus détendu (pause de 15 secondes).

Si vous le désirez, vous pouvez prolonger cette période de détente pendant quelques minutes. Lorsque vous vous lèverez, inspirez d'abord profondément, contractez graduellement tous vos membres, ouvrez vos yeux, puis expirez. Restez ensuite assis de 15 à 30 secondes sur le bord du lit ou du sofa afin d'éviter les étourdissements.

Annexe n° 7 :

Questionnaire IPAQ-SF

Nous nous intéressons aux différents types d'activités physiques que vous faites dans votre vie quotidienne. Les questions suivantes portent sur le temps que vous avez passé à être actif physiquement au cours des **7 jours précédents la chirurgie**. Répondez à chacune de ces questions même si vous ne vous considérez pas comme une personne active. Les questions concernent les activités physiques que vous faites au travail, dans votre maison ou votre jardin, pour vos déplacements, et pendant votre temps libre.

Pensez à toutes les activités **intenses** que vous avez faites au cours des **7 jours précédents la chirurgie**. Les activités physiques intenses font référence aux activités qui vous demandent un effort physique important et vous font respirer beaucoup plus difficilement que normalement. Pensez seulement aux activités que vous avez effectuées pendant au moins **10 minutes d'affilées**.

1. Au cours des **7 jours précédents la chirurgie**, combien y a-t-il eu de jours au cours desquels vous avez fait des activités physiques **intenses** comme porter des charges lourdes, bêcher, faire du VTT ou jouer au football ?

_____ jours par semaine

Je n'ai pas eu d'activité physique intense ➔ **Passez directement à la question 3**

2. Au total, combien de temps avez-vous passé à faire des activités **intenses** en moyenne par jour ?

..... heures(s) par jour minutes par jour

Je ne sais pas

Pensez à toutes les activités **modérées** que vous avez faites au cours des **7 jours précédents la chirurgie**. Les activités physiques modérées font référence aux activités qui vous demandent un effort physique modéré et vous font respirer un peu plus difficilement que normalement. Pensez seulement aux activités que vous avez effectuées pendant au moins **10 minutes d'affilée**.

3. Au cours des **7 jours précédents la chirurgie**, combien y a-t-il eu de jours au cours desquels vous avez fait des activités physiques **modérées** comme porter des charges légères, passer l'aspirateur, faire du vélo tranquillement, ou jouer au volley- ball ? **Ne pas inclure la marche.**

_____ jours par semaine

Je n'ai pas eu d'activité physique modérée ➔ **Passez directement à la question 5**

4. Au total, combien de temps avez-vous passé à faire des **activités modérées** en moyenne par jour ?

..... heures(s) par jour minutes par jour

Je ne sais pas

Pensez au temps que vous avez passé à **marcher** au cours des **7 jours précédents la chirurgie**. Cela comprend la marche au travail et à la maison, la marche pour vous rendre d'un lieu à un autre, et tout autre type de marche que vous auriez pu faire pendant votre temps libre pour la détente, le sport ou les loisirs.

5. Au cours des **7 jours précédents la chirurgie**, combien y a-t-il eu de jours au cours desquels vous avez **marché pendant au moins 10 minutes d'affilée**.

_____ jours par semaine

Je n'ai pas fait de marche → **Passez directement à la question 7**

6. Au total, combien de temps avez-vous passé à **marcher** en moyenne par jour ?

..... heures(s) par jour minutes par jour

Je ne sais pas

La dernière question porte sur le **temps que vous avez passé assis** pendant un jour de semaine, au cours du **mois précédent votre chirurgie**. Cela comprend le temps passé assis au travail, à la maison, lorsque vous étudiez et pendant votre temps libre. Il peut s'agir par exemple du temps passé assis à un bureau, chez des amis, à lire, à être assis ou allongé pour regarder la télévision.

7. Au cours des **7 jours précédents la chirurgie**, combien de temps avez-vous passé **assis** pendant un **jour de semaine** ?

..... heures(s) par jour minutes par jour

Je ne sais pas

Le questionnaire est terminé. Merci pour votre participation.

AUTEUR : Nom : Estermans

Prénom : Jordan

Date de soutenance : 10 octobre 2024

Titre de la thèse : Intérêt de l'imagerie motrice dans la rééducation à la marche de la personne amputée trans-tibiale d'origine vasculaire : réalisation d'un protocole d'étude interventionnelle, contrôlée et randomisée.

Thèse - Médecine - Lille - 2024

Cadre de classement : Médecine

DES + FST/option : Médecine Physique et de Réadaptation

Mots-clés : imagerie motrice, rééducation, marche, amputation

Résumé :

Introduction :

L'amputation majeure du membre inférieur, principalement d'origine vasculaire, est une intervention chirurgicale fréquente qui entraîne une réduction des capacités fonctionnelles. La rééducation vise à restaurer l'autonomie, particulièrement à travers l'amélioration de la marche. Cependant, chez cette population souvent sujette à des comorbidités et à une grande fatigabilité, les progrès peuvent être limités. L'imagerie motrice, définie comme la représentation mentale d'un mouvement sans exécution réelle, pourrait être un complément intéressant en augmentant le nombre de répétitions des exercices sans effort physique, influençant la plasticité cérébrale et les schémas moteurs. L'objectif principal de notre étude est d'évaluer son impact sur les capacités de marche.

Matériel et Méthode :

Il s'agira d'une étude interventionnelle, monocentrique, contrôlée et randomisée, en simple aveugle. Le groupe expérimental suivra un entraînement par imagerie motrice, tandis que le groupe contrôle pratiquera des séances de relaxation selon la méthode Jacobson. Le critère de jugement principal sera la distance parcourue au test de marche de 2 minutes. Un protocole d'entraînement en imagerie motrice a été élaboré en se basant sur les recommandations de la littérature.

Discussion :

L'imagerie motrice est principalement étudiée dans le cadre de la rééducation post-AVC, mais son utilisation chez les amputés reste peu explorée. Les études existantes sont souvent limitées en nombre de participants et mélangent différentes étiologies et niveaux d'amputation. Nous proposons d'affiner cette approche en travaillant sur une population homogène de patients amputés trans-tibiaux d'étiologie vasculaire ou diabétique. En standardisant notre protocole, nous espérons améliorer la puissance de l'étude et offrir une base solide pour les futures recherches.

Conclusion :

L'imagerie motrice semble prometteuse comme complément à la rééducation classique chez les amputés. Ce protocole propose un cadre pour une étude clinique visant à évaluer son efficacité durant la phase prothétique. Cette technique simple et peu coûteuse, pourrait éventuellement optimiser les résultats en renforçant les schémas moteurs et en anticipant les mouvements au niveau cortical. Il sera pertinent de tester cette approche dès la phase pré-prothétique et d'élargir les études à d'autres groupes d'amputés, indépendamment de leur âge, niveau ou étiologie d'amputation.

Composition du Jury :

Président : Monsieur le Professeur Vincent TIFFREAU

Assesseurs : Monsieur le Docteur Paul POTEL, Monsieur le Docteur Benoît LADRETTE

Directeur de thèse : Monsieur le Docteur Alexandre RIMETZ

