



UNIVERSITÉ DE LILLE
FACULTÉ DE MÉDECINE HENRI WAREMBOURG
Année : 2022

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MÉDECINE

Batterie d'évaluation à l'effort aérobie, anaérobie et musculaire chez les sujets amputés de membre inférieur à la phase pré-prothétique : élaboration d'une étude pilote.

Présentée et soutenue publiquement le 04 octobre 2022 à 18 heures
au Pôle Recherche
par Clément DUCHEINE

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Julien GIRARD

Assesseurs :

Monsieur le Professeur André THEVENON

Madame le Docteur Valérie WIECZOREK

Monsieur le Docteur Frédéric CHARLATE

Directeur de thèse :

Monsieur le Professeur Vincent TIFFREAU

LISTE DES ABREVIATIONS

AMMI Amputation Majeure de Membre Inférieur

AOMI Artériopathie Oblitérante des Membres Inférieurs

AVC Accident Vasculaire Cérébral

BPCO Broncho-Pneumopathie Chronique Obstructive

CHRU Centre Hospitalier Régional Universitaire

CPAM Caisse Primaire d'Assurance Maladie

FC Fréquence Cardiaque

HAS Haute Autorité de Santé

IMC Indice de Masse Corporelle

MIF Mesure d'Indépendance Fonctionnelle

MPR Médecine Physique et de Réadaptation

PMSI Programme de Médicalisation du Système d'Information

PMA Puissance maximale aérobie

RER Ratio des Equivalents Respiratoires (VCO_2/VO_2)

VEMS Volume Expiratoire Maximal par Seconde

VO₂ Consommation en oxygène

VMM Ventilation Minute Maximale

SOMMAIRE

Table des matières

I. INTRODUCTION.....	1
A. Définitions.....	1
B. Prévalence.....	2
C. Etiologie et comorbidités.....	3
D. Surmortalité	5
E. Parcours de soins du sujet amputé en France.....	6
F. Modalités de prescription de l'appareillage en France.....	9
G. Evaluation de l'issue de la rééducation.....	11
H. Facteurs prédictifs de l'issue de la rééducation	15
I. « Forme physique » et appareillage.....	16
1. Rôle des filières énergétiques	16
2. Capacités aérobies comme facteur limitant la prothésisation.....	18
3. Capacités anaérobies et limitation d'activités	31
4. Capacités musculaires et limitation d'activités.....	32
II. OBJECTIF :.....	34
III. METHODE, MATERIEL, POPULATION.....	35
A. Evaluation des capacités physiques en phase préprothétique	35
1. Evaluation des capacités aérobies	35
2. Evaluation des capacités musculaires.....	38

3.	Evaluation des capacités anaérobies	39
B.	Evaluation des capacités de marche du sujet amputé de membre inférieur à l'issue de la rééducation	43
1.	Evaluation quantitative des capacités de marche.....	43
2.	Evaluation qualitative des capacités de marche.....	46
IV.	RESULTATS.....	51
A.	Population.....	51
B.	Protocole.....	53
1.	Evaluation aérobie.....	53
2.	Evaluation anaérobie et musculaire sur dynamomètre d'isocinétisme	56
C.	Objectif.....	60
1.	Principal : faisabilité du protocole	60
2.	Secondaires :	60
D.	Plan expérimental :	61
E.	Analyses statistiques	62
F.	Nombre de participants.....	63
V.	DISCUSSION.....	64
A.	Résultats attendus :	64
1.	Protocole faisable	64
2.	Concordance avec données de la littérature	65
3.	Intérêt médical	70
B.	Difficultés attendues	74

1. Grande hétérogénéité des profils de patients	74
2. Complications post-opératoires	75
3. Motivation	78
C. Perspectives :	78
VI. CONCLUSION.....	80

RESUME

Contexte

L'amputation majeure de membre inférieur, ie d'un niveau plus proximal que la cheville, est une pathologie fréquente, d'étiologie le plus souvent vasculaire, touchant des patients aux multiples comorbidités. L'issue de cette rééducation est influencée par de nombreux facteurs, dont font partie les capacités physiques. Ces capacités peuvent correspondre aux filières énergétiques aérobie, anaérobie lactique ou encore anaérobie alactique, et chacune de ces filières a un impact théorique ou prouvé dans la déambulation avec prothèse. Ainsi, leur évaluation lors de la phase pré-prothétique est importante.

Méthode

Nous avons effectué une revue de la littérature sur la base de données PUBMED, concernant les modalités validées d'évaluation des capacités aérobie, anaérobies et musculaires ainsi que d'évaluation de la marche des sujets ayant subi une amputation majeure de membre inférieur.

Résultats

Il n'existe à ce jour pas de batterie d'évaluation à l'effort aérobie, anaérobie et musculaire validée à la phase pré-prothétique. Nous proposons donc l'élaboration d'une telle batterie, se déroulant dans les six premières semaines après l'admission de patients ayant subi une amputation majeure de membre inférieur.

L'évaluation aérobie se déroulera durant une épreuve d'effort incrémentale par rampe sur ergocyclomètre fauteuil en unijambiste, dont le résultat principal sera le pic de consommation en dioxygène (VO_{2pic}).

L'épreuve anaérobie lactique et l'épreuve musculaire feront appel à une évaluation isocinétique du membre non amputé pour permettre leur réalisation indépendamment du niveau d'amputation. Cette évaluation isocinétique consistera en des mouvements concentriques réciproques de flexion-extension de genou, à une vitesse angulaire de $120^\circ/s$. Le résultat principal sera le moment de force maximal du quadriceps lors de cinq répétitions pour l'évaluation musculaire, et le travail total de trente répétitions pour l'évaluation anaérobie.

A l'issue de la rééducation, dont le contenu ne sera pas modifié par rapport à une rééducation habituelle, des tests de marche seront réalisés notamment le test de marche de deux minutes (2MWT) et le timed-up-and-go test (TUG) pour une appréciation quantitative ainsi que l'échelle SIGAM-fr pour une évaluation qualitative.

La faisabilité de ce protocole d'évaluation à l'effort sera appréciée sur un échantillon de 20 patients, inclus consécutivement dans le service de Médecine Physique et de Réadaptation du CHRU de Lille,

Conclusion

Nous pensons qu'une batterie d'évaluation à l'effort sur sujet amputé de membre inférieur lors de la phase pré-prothétique est faisable et qu'il existe un intérêt médical, et pronostique en termes d'issue de la rééducation voire de morbi-mortalité. En effet, sur le plan médical, une évaluation à l'effort pourrait permettre une classification du risque cardiovasculaire chez ces patients, à l'instar de la classification du risque dans les suites d'un syndrome coronarien aigu. Sur le plan rééducatif, le réentraînement à l'effort pourrait être basé sur les résultats de cette batterie. Par ailleurs, nous pourrions élaborer des modèles de prédiction des capacités de marche des sujets amputés basés sur une corrélation entre les capacités à l'effort lors de la phase pré-prothétique et les capacités de marche à l'issue de la rééducation. Enfin, à terme, les capacités de marche avec prothèse dictant la prescription et la prise en charge financière de l'appareillage en France, des objectifs de déambulation basés sur des modélisations issues des résultats de cette batterie d'évaluation à l'effort pourraient permettre de cibler plus précocement l'appareillage nécessaire.

I. INTRODUCTION

A. Définitions

L'amputation se définit comme l'ablation de toute ou partie d'un membre.

Les niveaux d'amputation possibles sont multiples, et chaque niveau a ses spécificités en termes d'appareillage. Nous nous intéresserons ici à l'amputation majeure de membre inférieur (AMMI), qui est définie par une amputation de membre inférieur au dessus du niveau de la cheville, c'est-à-dire les amputations transtibiales, désarticulations de genou (dont Gritti), les amputations transfémorales, désarticulations de hanches et amputations transilio-lombaires, comme décrit par Monroe en 2007.¹

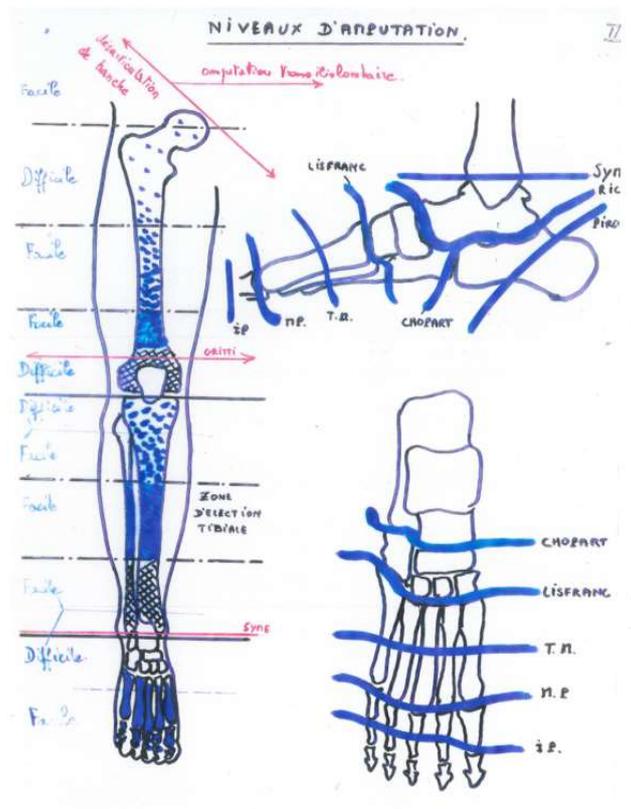


Figure 1 Niveaux d'amputation, Book de l'Interne, GIRL²

B. Prévalence

Peu d'études sont disponibles à ce jour concernant l'épidémiologie actuelle de l'amputation en France. Une étude réalisée par Fosse et al.³ en 2009 faisait état, sur base des données du PMSI, de 17551 admissions pour amputation sur l'année 2003, soit 15353 personnes, c'est-à-dire une incidence annuelle de 26 / 100000. L'étiologie retrouvée était, dans la grande majorité des cas, vasculaire (82,8%).

Nous n'avons, à ce jour, pas trouvé d'études épidémiologiques plus récentes concernant la prévalence de l'amputation majeure de membre inférieure.

Cependant sur la base des données PMSI, on peut recenser environ 7650 séjours pour amputations majeures de membre inférieur pour l'année 2019, regroupant les désarticulations de hanche, les amputations de niveau transtibial, les désarticulations de genou, les amputations à travers l'os coxal ou iliaque, les amputations transfémorales, les amputations interilioabdominales (codes NZFA001, NZFA002, NZFA003, NZFA006, NZFA007, NZFA008, respectivement).

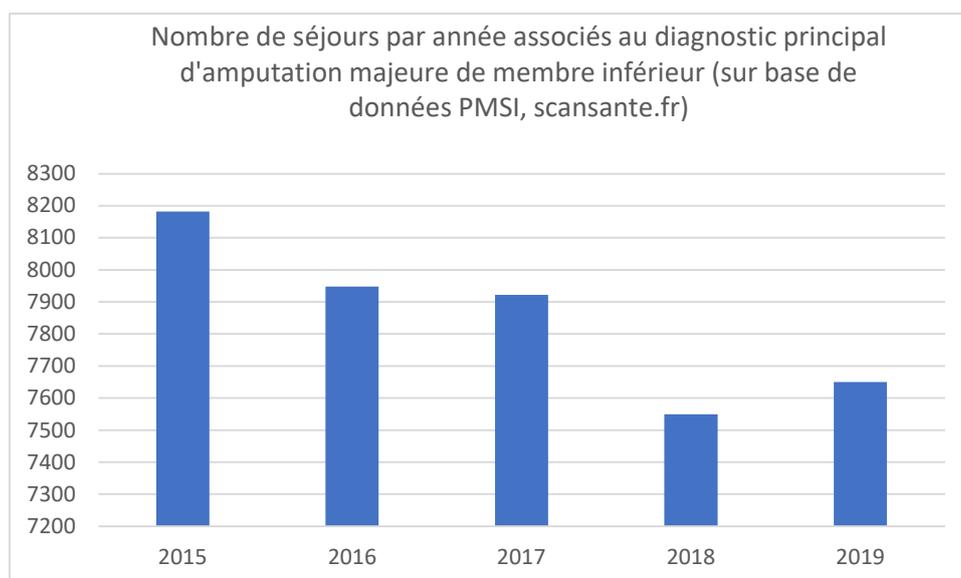


Figure 2 nombre de séjours pour amputation majeure de membre inférieur, par an en France, scansante.fr

D'après Kathryn Ziegler-Graham et al.⁴, la prévalence de l'amputation majeure de membre inférieur pourrait doubler aux États-Unis d'ici 2050. Étant donné le modèle occidental que représentent les États-Unis, on peut supposer une augmentation de la prévalence des amputations majeures de membre inférieur en France dans les décennies à venir, soulignant à nouveau l'intérêt en termes de santé publique que représente cette pathologie.

C. Étiologie et comorbidités

Même si les populations d'étude peuvent différer de la population française, des études récentes notamment nord-américaines, se sont intéressées à l'étiologie et aux comorbidités dans le cadre de l'amputation de membre inférieure. Dans une étude rétrospective portant sur 1 millions d'hospitalisations pour amputation majeure de membre inférieur entre 2000 et 2016 aux États-Unis⁵, sur base des données informatique (NIS, National Inpatient Sample), l'étiologie retrouvée était pour 72% des cas une artériopathie oblitérante des membres inférieurs, 15% une infection, ischémique aiguë pour 4% des patients, traumatique pour 3,6% des patients et oncologique dans 1,5% des cas.

En Espagne, Lidia Marcos Garcia⁶ et son équipe se sont intéressées à l'épidémiologie des patients amputés de membre inférieur sur deux décennies (1996-2005 et 2006-2015) dans leur service de chirurgie vasculaire à Barcelone. L'étiologie de l'amputation était l'ischémie critique dans 50% des cas, une ischémie compliquée de surinfection dans 38% des cas, infectieuse pure dans 7,6% des cas et ischémique aiguë dans 4% des cas. Concernant les comorbidités, on peut noter la prévalence importante de l'hypertension artérielle (80%), du diabète (80%), de la cardiopathie ischémique (34%) et une augmentation du taux de patients en insuffisance rénale terminale dialysés

(30%). A l'issue de la rééducation, seuls 44,5% des patients étaient porteurs d'une prothèse et 40% capables de marcher avec leur prothèse.

Une étude épidémiologique menée à Genève⁷, a retrouvé ces mêmes étiologies dans des proportions similaires. Il était également montré que l'incidence de l'amputation majeure de membre inférieur était croissante avec l'âge des patients. L'âge apparaissant donc comme un facteur de risque majeur, au même titre qu'il constitue un facteur de risque cardiovasculaire majeur non modifiable.

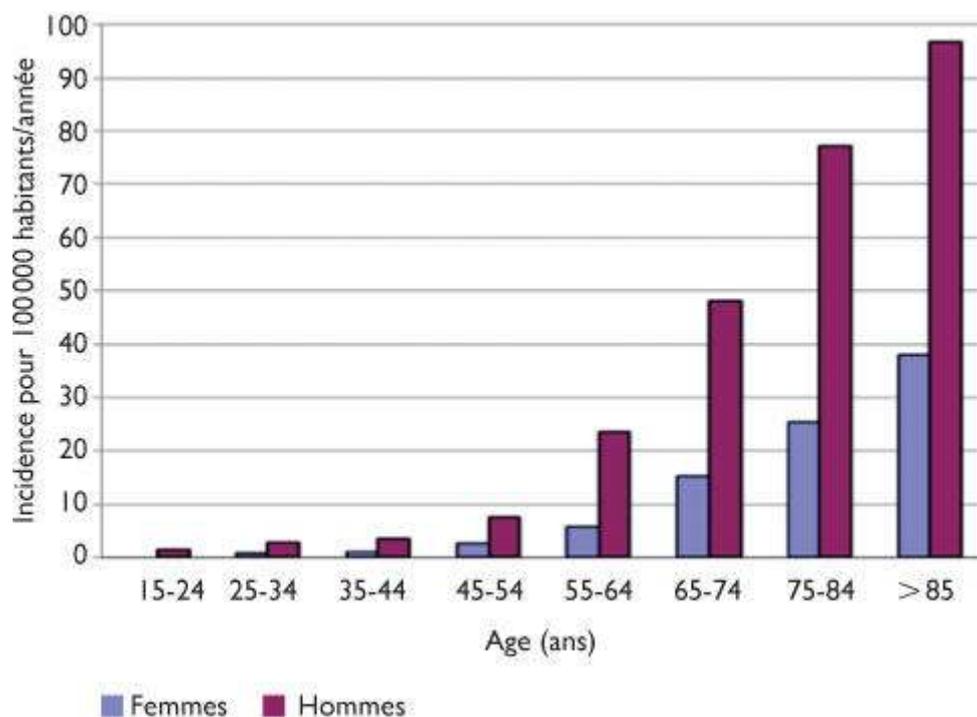


Figure 3 Incidence de l'amputation de membre inférieur en fonction de l'âge et du sexe à Genève, Carmona et al, 2014

On retrouve ces comorbidités décrites par Kalbaugh et al aux Etats-Unis⁵, qui s'étaient également intéressés à l'évolution de la prévalence des comorbidités chez les patients amputés de membre inférieur. En 2016, on notait une prévalence prépondérante du diabète sucré (63,5%), d'hypertension (41,6%) de coronaropathie (36,8%) d'insuffisance cardiaque (26,4%) de bronchopneumopathie chronique obstructive (18,9%). L'insuffisance rénale chronique était la comorbidité dont la prévalence avait

le plus augmenté entre 2000 et 2016, passant de 5,8% à 38,9% chez ces sujets amputés.

D. Surmortalité

L'amputation est une chirurgie à risques, comme en attestent les statistiques s'intéressant à la morbi-mortalité post-opératoire. En 2019, Whittaker et al.⁸ ont étudié le taux de mortalité à 30 jours d'une amputation majeure de membre inférieur. L'étiologie de l'amputation était pour 40% des cas vasculaire, 50% infectieuse, et les dix pourcents restants étaient liés à une cause traumatique ou néoplasique. Le niveau d'amputation était pour 57% des cas trans-fémoral. Le taux de mortalité à 30 jours était de 5,1% mais les auteurs ont jugé ce taux particulièrement faible par rapport aux données de la littérature, habituellement entre 7,0% et 22,0%.

Il existe également une surmortalité à moyen et long termes dans la population des patients amputés de membre inférieur, de niveau trans-tibial et plus proximal d'étiologie non-traumatique, comme le rapporte une revue systématique de la littérature réalisée par Meshkin et al.⁹ en 2021. Dans leur méta-analyse, les taux de mortalité à 1 an, 3ans, 5ans et 10 ans étaient de 33%, 53%, 64% et 80% respectivement, et ces données étaient similaires que les patients soient nord-américains ou européens (Royaume-Uni, Pays-Bas et Suède notamment). Cette revue de littérature décrivait également des patients polypathologiques avec une prévalence de 77% pour l'AOMI, 65% pour le diabète sucré et 29% pour l'insuffisance rénale.

Au total, l'amputation majeure de membre inférieur est une pathologie relativement fréquente, touchant des patients très souvent âgés et polypathologiques, dont le pronostic est grevé à court, moyen et long terme.

E. Parcours de soins du sujet amputé en France

La HAS (*Haute Autorité de Santé*) en 2006, a établi des recommandations concernant la prise en charge de l'amputation de membre inférieur pour cause artérielle (AOMI). La prise en charge rééducative doit être multidisciplinaire, initialement en hospitalisation complète dans un service spécialisé. Etaient ensuite distinguées trois phases : pré-prothétique, phase de prothétisation, puis phase de réadaptation.

Selon les études, la durée du séjour de rééducation est fréquemment entre 2 et 3 mois, avec des extrêmes allant de 20 jours à 440 jours. Une étude suédoise¹⁰, menée sur 5768 patients entre 2011 et 2019 montrait une durée de rééducation de 67 jours en moyenne pour les amputations de niveau trans-tibial et 97 jours pour les amputations de niveau trans-fémoral.. Une autre étude canadienne, datant de 2009, retrouvait une durée de 84 jours en moyenne, dont 49 jours de rééducation avec la prothèse.

- La phase pré-prothétique :

Cette phase doit permettre la bonne évolution locale du membre résiduel, en termes de cicatrisation, de gestion des douleurs (nociceptives ou neuropathiques) et de diminution de l'œdème. Elle comporte également un versant plus général avec une récupération d'une autonomie dans les activités de vie quotidienne telle que l'autonomisation aux déplacements en fauteuil roulant ou aux transferts, l'équilibre unipodal pour la toilette ou l'habillement. Est également mentionnée la rééducation cardiovasculaire adaptée au patient, sans en préciser les modalités, avec évaluation des capacités à l'effort, là encore sans précision.

Chez ces patients considérés à très haut risque cardiovasculaire, à l'instar des sujets atteints de coronaropathie ou maladies cérébro-vasculaires, le contrôle des facteurs de risque doit être optimisé : équilibrage d'un diabète, correction d'une dyslipidémie

(objectif LDLc < 0,55g/L pour les patients amputés pour cause vasculaire selon les recommandations de l'ESC en 2021¹¹), contrôle tensionnel (< 135/85mmHg), dépistage et suivi d'une maladie rénale chronique, arrêt du tabac, règles hygiéno-diététiques.

Au total, cette phase prépare le patient d'un point de vue local avec la cicatrisation du moignon et d'un point de vue général au port et à l'utilisation d'une prothèse.

- **La phase de prothétisation :**

Le choix de l'appareillage ou non est soumis à une évaluation globale et à l'appréciation du médecin responsable. Ce choix s'intègre aussi et surtout dans le projet de vie du patient, puisqu'il s'agit là de l'objectif ultime de toute prise en charge en service de Médecine Physique et de Réadaptation.

L'appareillage doit donc permettre une déambulation adaptée aux capacités physiques du patient et son projet de vie. La rééducation comporte notamment une éducation à la bonne gestion de l'appareillage, une autonomisation aux transferts, un travail de l'équilibre avec la prothèse, un travail de marche conjointement à un réentraînement à l'effort, dont les modalités ne sont pas décrites par la HAS.

- **La phase de réadaptation :**

Cette phase doit aboutir au retour à domicile, avec appareillage de membre inférieur permettant la déambulation et/ou la prescription d'un fauteuil roulant, avec une autonomie optimale, à la fois par le biais d'une amélioration des capacités du patient, mais également si nécessaire via une adaptation du lieu de vie, avec l'aide d'ergothérapeute par exemple. Quand cela n'est pas possible, une institutionnalisation adaptée pourra éventuellement être discutée.

Si ces étapes se basent sur des critères objectifs en termes de délai, ou d'évolution clinique, il persiste une part non négligeable de subjectivité de la part de l'équipe pluridisciplinaire dans l'évaluation et dans la prescription ou non d'un appareillage. C'est ce qui a été montré dans l'étude rétrospective de E.Kurichi et al¹² en 2007, menée à Philadelphie et s'intéressant aux facteurs associés à la prescription d'une prothèse de membre inférieur chez 2375 sujets âgés amputés de membre inférieur. Ainsi, ils mettaient en évidence que, même après avoir ajusté sur des paramètres tels que le sexe, les comorbidités ou encore la mobilité pré-amputation, l'âge inférieur à 76 ans était associé à un plus grand taux de prescription d'appareillage.

Une étude observationnelle descriptive réalisée dans le cadre de la Thèse d'exercice en médecine du Dr Coisne, dans les services de Médecine Physique et de Réadaptation ainsi que de Soins de Suite et de Réadaptation de l'hôpital Swynghedauw au CHRU de Lille entre 2013 et 2014, retrouvait pour 83% des cas une étiologie vasculaire à l'amputation de membre inférieur, carcinologique pour 12% et autres (dont traumatique) pour 5% des cas. Les comorbidités étaient d'autant plus fréquentes que la cause était vasculaire, avec en moyenne 4,75 facteurs de risque cardiovasculaires surajoutés, notamment le diabète présent dans 89% des cas ou l'hypertension artérielle présente dans les mêmes proportions. Au cours du suivi en hospitalisation de 34 patients, durant en moyenne 65 jours, seulement 41% avaient bénéficié d'un appareillage. Chez les patients ne bénéficiant pas de prothèse, un de freins à l'appareillage relevés était une trop forte diminution des capacités physiques. En l'absence de données quantifiables, cette diminution des capacités physiques était appréciée par le médecin en charge du patient, aidé de l'avis des rééducateurs.

F. Modalités de prescription de l'appareillage en France

En France, la prescription des prothèses est soumise aux règles de prescription générales du grand appareillage. En effet, celle-ci n'est possible que par un certain nombre de spécialités médicales ou chirurgicale, comme la Médecine Physique et de Réadaptation, ou même limitée aux seul.e.s spécialistes en médecine physique et de réadaptation (comme pour la prescription des pieds prothétiques à restitution d'énergie). Cette prescription est faite sur une ordonnance de grand appareillage avec demande d'entente préalable auprès de la CPAM (Caisse Primaire d'Assurance Maladie). A ces premières restrictions s'ajoutent des critères individualisés pour la prescription et donc pour le remboursement de ces appareillages par la sécurité sociale. Le médecin prescripteur doit par exemple être en mesure de pouvoir justifier d'un périmètre de marche continu supérieur à deux kilomètres, une vitesse de marche supérieure ou égale à 4km/h, la possibilité de descente d'un plan incliné d'au moins 15% et la descente d'escaliers à pas alternés pour la prescription d'un genou prothétique électronique (par exemple RHEO KNEE ou 3C100 C-Leg ou HYBRID-1P360). Concernant les pieds prothétiques à restitution d'énergie, le choix entre les différentes classes de pied (cf infra) dépend également des capacités fonctionnelles du sujet, par exemple la possibilité de marche à l'intérieur du bâtiment autre que le domicile, ou la marche en terrain accidenté.

Classe de pied à restitution d'énergie	Indication
Classe I	Déplacements au minimum dans des bâtiments autres que le domicile
Classe II	Déplacements au minimum en dehors du domicile et d'autres bâtiments
Classe III	Déplacements variés, complexes, dans un projet de vie qui doit être justifié pour bénéficier d'une prise en charge financière

Figure 4 Critères de prise en charge financière des pieds prothétiques à restitution d'énergie

Une étude de cohorte multicentrique parue en 2021, par Lansade et al.¹³ a pu montrer que chez les patients amputés au niveau transfémoral, la prescription d'un genou prothétique électronique de type C-Leg (Ottobock), permettait une amélioration significative des capacités locomotrices, évaluées par le score LCI-5. Les patients ayant pu bénéficier d'une telle prescription ont également vu leur score de satisfaction (QUEST 2.0) et leur score d'évaluation de qualité de vie (SF-36) améliorés significativement. La comparaison des patients ayant atteint les critères de remboursement – et donc de prescription d'un tel genou prothétique – avec les patients ne les ayant pas atteints, n'a pas permis de retrouver de différence significative en termes d'âge, de sexe, de niveau d'amputation ni d'étiologie. On peut alors émettre l'hypothèse que les capacités cardiorespiratoires du sujet pourraient être un des facteurs limitant l'atteinte des critères de remboursement d'un tel appareillage, conjointement avec des facteurs motivationnels ou en lien avec l'équilibre.

Ainsi à l'heure actuelle, pour arriver à la prescription de l'appareillage final, le processus de prothétisation s'effectue à tâtons, en cela qu'il commence par un appareillage « simple » pour se complexifier au fil de la prise en charge, au gré des progrès faits par le patient sur le plan fonctionnel. Il n'existe cependant à ce jour, que peu de critères objectifs durant la phase pré-prothétique qui permettraient au médecin de prévoir l'issue fonctionnelle du patient, et ainsi pouvoir anticiper la prescription d'un appareillage le plus adapté. Un de ces éléments prédictifs est l'échelle AMPnoPRO, qui consiste en un test de mobilité et d'équilibre sans la prothèse, pouvant être réalisé précocement dans la phase pré-prothétique. Spaan et al. en 2017¹⁴, évaluaient que le résultat du test AMPnoPRO en phase pré-prothétique expliquait jusqu'à 65% de la variance du test de marche de deux minutes (2MWT) réalisé à l'issue de la rééducation.

Les modalités de prescription en France soulèvent donc l'intérêt de tests prédictifs de capacités fonctionnelles chez les sujets amputés de membre inférieur, et ce dès la phase pré-prothétique, afin d'ajuster le type d'appareillage optimal pour chaque patient. C'est-à-dire le type d'appareillage le plus performant et lui permettant la meilleure autonomie fonctionnelle en s'incluant dans son projet de vie qui lui sera pris en charge.

G. Evaluation de l'issue de la rééducation

La notion de succès ou d'échec d'une prothétisation dans le cadre d'une amputation de membre inférieur, que l'on retrouve dans de nombreuses études, dépend de nombreux facteurs. Des facteurs physiques, tels que l'équilibre, les capacités physiques et bien d'autres facteurs détaillés ci-après, entrent en jeu, mais il faut mentionner avant toute chose le projet de vie du patient et sa motivation. Le succès de l'appareillage est donc individualisable et individualisé dans la pratique courante, étant donné l'impact des dimensions psychologique et sociale.

Ainsi, dépendamment de la population d'intérêt et du seuil sélectionné pour le définir dans un contexte de recherche scientifique, ce « succès » varie de 5 à 100 % selon les études. Cette hétérogénéité est d'ailleurs soulignée dans l'introduction de nombreuses études et notamment des revues systématiques citées plus loin concernant la déambulation des sujets amputés de membre inférieur, et nous allons citer ci-après quelques exemples de description de sujet de la prothétisation.

Le seuil retenu par Chin et al.¹⁵ pour définir le succès de la prothétisation était la marche avec au plus l'aide d'une canne anglaise sur une distance d'au moins 100 mètres. Une étude espagnole, par Fajardo et al.¹⁶ en 2017 par ailleurs proposait deux seuils : l'un était de marcher au moins 45mètres quelle que soit l'aide technique utilisée, l'autre était de marcher au moins 45 mètres avec au plus une canne anglaise.

Darter et al.¹⁷ dans une revue narrative de la littérature, ont retenu un périmètre de marche de 500m pour distinguer les patients amputés de membre inférieur pour cause traumatique ayant une bonne mobilité de ceux étant limités sur le plan fonctionnel, révisant ainsi à la baisse le taux de succès de prothétisation (20 à 65%). L'absence de seuil précis en termes de capacités de marche dans la littérature témoigne donc de la complexité de la définition du succès de l'appareillage et que ce dernier est avant tout défini avec le patient.

Chez les sujets plus jeunes, la reprise professionnelle était parfois retenue comme un critère de succès de la prothétisation (Darter et al.¹⁷) mais ce critère est discutable car ne peut s'appliquer qu'à une population en situation professionnelle stable avant l'amputation, et tiendrait difficilement compte des reclassements professionnels ou reconversions, inhérentes à l'amputation et l'appareillage.

Norvell et al.¹⁸ ont proposé en 2009 une autre vision du succès de la prothétisation, basée sur le score fonctionnel LCI-5 (*Locomotor Capabilities Index – 5 items*). Une prothétisation était considérée comme un succès lorsque ce score à 1 an était au moins égal à celui évalué en phase préopératoire, c'est-à-dire si le patient recouvrait sa mobilité. L'écueil majeur était le biais de remémoration, lorsque les capacités fonctionnelles préopératoires étaient recueillies après l'amputation, ce qui était le cas dans la majorité des cas. Leur étude, portant sur 87 sujets amputés pour cause vasculaire, retrouvait alors un succès dans 29% des cas pour les amputations transfémorales et 41% pour les amputations trans-tibiales. Cette approche permet de prendre en compte la mobilité préopératoire dans l'évaluation du succès, et ainsi une individualisation de cette notion de « succès de la prothétisation », plutôt que l'utilisation d'un seuil unique.

Une étude rétrospective menée par Katherine McCallum et al.¹⁹ à New York, portant sur 538 sujets inclus successivement entre janvier 2009 et décembre 2014, retrouvait que le taux de patients marchant à 6 mois après amputation était de 58% pour les amputations sous-gonales, et 25% pour les amputations sus-gonales, et ces taux étaient de 83% et 45% respectivement en préopératoire. Étaient considérés comme marchant les sujets déambulant de façon autonome avec ou sans prothèse de membre inférieur, sans liste restrictive en termes d'aides techniques, et comme non marchant les sujets se déplaçant en fauteuil roulant ou alités. A noter que les sujets étaient âgés (67ans en moyenne) tous porteurs de comorbidités importantes et qu'aucune amputation n'était d'origine traumatique. Ceci souligne non seulement le défi que représente la récupération d'une déambulation autonome pour ces patients, mais aussi peut-être leur déconditionnement physique, notamment cardiorespiratoire, découlant parfois d'une histoire médicale de plusieurs années, avec dégradation fonctionnelle.

Chez les sujets marchants, il est établi que de meilleures capacités de marche sont associées à une meilleure participation sociale et donc une meilleure qualité de vie, comme dans une étude de Wurdeman et al.²⁰ où le score PLUS-M, évaluant la mobilité, était fortement corrélé à la qualité de vie (PEQ-WB, $r=0,51$) et la satisfaction globale ($r= 0,475$). De même, une revue systématique de la littérature par Davie-Smith et al.²¹ a montré en 2017 que la marche avec prothèse était le facteur avec le plus gros impact sur la qualité de vie chez des sujets amputés de membre inférieur pour cause vasculaire, et le niveau d'amputation trans-fémoral était négativement corrélé à la qualité de vie, en lien avec les moindres capacités de marche. Ainsi, chez les sujets ayant bénéficié d'un appareillage, il est important de décrire leurs capacités fonctionnelles en termes de déambulation, qu'elle soit limitée au domicile ou

permettant les activités extérieures sans aides techniques. C'est ce qu'ont également souligné Damiani et al.²² en 2020, montrant l'impact qu'a le port régulier de la prothèse et de la déambulation pour l'amélioration de la participation sociale, avec notamment 85% des sujets amputés trans-tibiaux qui obtenaient un score WHS (Walking Handicap Scale) supérieur à 4 lorsqu'ils utilisaient leur prothèse régulièrement versus seulement 1,4% pour ceux qui ne l'utilisaient pas. En 2011, Sinha et al.²³ ont retrouvé que la qualité de vie des sujets amputés était corrélée notamment à l'utilisation régulière de la prothèse, à l'utilisation d'aide techniques, aux comorbidités et aux douleurs, qu'elles soient du membre fantôme ou du membre résiduel. Toutes ces variables étant étroitement liées aux capacités de marche, on comprend ainsi l'importance qu'a la récupération de la marche autonome dans la prise en charge de ces patients.

Etant donné qu'il existe un continuum entre les patients qui ne portent pas leur prothèse, se déplaçant uniquement au sein du domicile avec un fauteuil roulant et les patients qui utilisent leur prothèse dans des situations complexes, professionnelles voire sportives, il pourrait être préférable de parler d'issue de la prothétisation au sens large, plutôt que de succès – cette notion de succès étant individuelle pour les raisons déjà évoquées. De plus, parler d'échec pour un patient qui se déplace en fauteuil roulant manuel, mais dont la qualité de vie est préservée paraît injustifié.

Il existe donc un intérêt de connaître non seulement les facteurs prédictifs de la possibilité ou non du port de la prothèse, mais également ceux qui influencent positivement les capacités de marche chez les sujets porteur de prothèse et déambulant, car l'issue de la rééducation est associée à la qualité de vie du patient.

H. Facteurs prédictifs de l'issue de la rééducation

En 2020, Preece et al.²⁴ ont publié une revue systématique de la littérature des scores et échelles prédictives de risque de mortalité, morbidité ou encore de capacités fonctionnelles chez les sujets amputés. Le score décrit par Bowrey et al.²⁵ (BLARt, Blatchford Allman Russel tool) montrait une excellente capacité à prédire en phase préopératoire les patients pour lesquels les capacités fonctionnelles seraient très limitées à un an, se basant sur des scores A, B et C sur l'échelle SIGAM. Ce score (BLARt) prenait en compte l'âge, le sexe, la mobilité pré-amputation, l'étiologie de l'amputation, le niveau d'amputation, les comorbidités notamment cardiovasculaires, l'état du moignon ou encore la présence d'une démence. Un score supérieur ou égal à 13 était prédictif d'une utilisation de la prothèse pour les transferts uniquement ou une non-utilisation de la prothèse à un an (SIGAM A, B).

Hamamura et al.²⁶ dans une étude observationnelle rétrospective en 2009, montraient que le VO₂max, l'équilibre unipodal, le nombre de comorbidités et la motivation étaient associés à la réussite de la prothétisation, définie comme dans l'étude de Chin et al.¹⁵, soit une marche d'au moins 100 mètres avec une canne au plus.

Une revue systématique de la littérature réalisée par Sansam et al.²⁷ en 2009 retrouvait l'âge, l'état cognitif, la forme physique (notamment le VO₂max), l'équilibre unipodal l'indépendance dans les activités de vie quotidienne, la mobilité pré-amputation, le délai entre chirurgie et prise en charge rééducative spécifique, ainsi que les problèmes locaux inhérents au moignon (cicatrisation, douleurs...) comme étant prédictif des capacités de marche chez les sujets amputés de membre inférieur.

En 2016, Kahle et al.²⁸ ont proposé dans une revue systématique de la littérature de classer les facteurs prédictifs de déambulation des sujets amputés de membre inférieur, en fonction du nombre d'occurrence dans la littérature et de la qualité des

études dans lesquelles ils étaient mentionnés. Ainsi, la plus grande association avec les capacités de marche était retrouvée pour le niveau d'amputation, l'âge, la forme physique (notamment le VO₂max) et le nombre de comorbidité. De nombreux autres facteurs étaient retrouvés mais moins fortement associés comme les troubles cognitifs, l'étiologie de l'amputation, l'équilibre unipodal, le mode de vie, l'anthropométrie (IMC), la motivation, le sexe et le tabagisme actif.

Une récente étude rétrospective par Wong et al.²⁹ à New York montrait que le score au PEQ-MS (Prosthesis Evaluation Questionnaire Mobility Subscale), évaluant les difficultés perçues par le patient dans douze tâches de la vie quotidienne, était associé notamment au sexe, la cause de l'amputation, le score de Houghton, aux performances du test de marche de 2 minutes (2MWT), ainsi qu'aux comorbidités cardiovasculaires et tégumentaires au niveau du moignon. Ceci souligne à nouveau le lien entre les capacités de marche et les autres limitations d'activité chez le sujet amputé de membre inférieur.

Concernant l'équilibre et la déambulation pré-prothésisation, l'échelle AMPnoPRO réalisée en début de prise en charge a été montrée prédictive des performances réalisées sur le Timed-Up-and-Go test (TUG) et le test de marche de 2 minutes (2MWT) réalisés en fin de séjour de rééducation¹⁴. C'est d'ailleurs, à notre connaissance, la seule échelle de limitation d'activité réalisable en phase pré-prothétique prédictive des capacités de marche à l'issue de la rééducation.

I. « Forme physique » et appareillage

1. Rôle des filières énergétiques

En fonction des études et des auteurs, le terme générique de « forme physique ^{15,27,28}» fait référence à plusieurs concepts tout à fait différents : VO₂max ou capacité aérobie

maximale, force musculaire isométrique, force musculaire isocinétique, voire résultats de tests fonctionnels comme le test de marche de six ou de deux minutes ou encore le Timed Up-and-Go. Ce terme est en effet imprécis et mérite d'être défini.

Pour distinguer plusieurs modalités d'évaluation des capacités physiques, on peut faire appel aux trois grandes filières énergétiques : aérobie, anaérobie lactique et anaérobie alactique. Ces trois filières énergétiques permettent une resynthèse d'ATP, dont l'hydrolyse permet la production d'énergie utilisée dans de nombreuses réactions cellulaires – la contraction musculaire en étant une des résultantes – dans des conditions métaboliques différentes. Très schématiquement, pour visualiser l'impact des différentes filières dans diverses activités de la vie quotidienne ou divers efforts physiques, ainsi que de leurs modalités d'évaluation, on peut présenter ces filières comme suit.

Le métabolisme aérobie³⁰ correspond à l'oxydation des acides gras et des glucides en présence d'oxygène permettant la resynthèse d'ATP. Sa capacité maximale est mesurée par le VO₂max (consommation maximale en oxygène) ou la PMA (puissance maximale aérobie). Il présente l'inconvénient d'avoir une importante inertie, c'est-à-dire qu'il lui faut plusieurs minutes pour s'adapter à un effort, mais l'intérêt majeur d'être très endurant. Ainsi pour des efforts de plus courte durée ou d'intensité supérieur, l'organisme fait appel à des filières énergétiques anaérobies.

Le métabolisme anaérobie lactique³⁰ correspond à la glycolyse, aboutissant à la formation de 2 molécules ATP et de lactate à partir d'une molécule de glucose, en l'absence d'oxygène. Cette filière énergétique a une inertie beaucoup plus courte, permettant d'être recrutée beaucoup plus précocement que la filière aérobie. Son inconvénient principal est son épuisement en moins de 3 minutes.

Le métabolisme anaérobie alactique³⁰ fait appel à l'utilisation du stock d'ATP – certes très restreint – au sein de la cellule, reconstitué rapidement via l'action notamment de la créatine phosphokinase (CPK) à partir de la phosphocréatine. L'inertie de cette filière énergétique est quasi-nulle mais elle s'épuise rapidement, en une quinzaine de secondes environ.

De fait, bien que ces filières énergétiques se recoupent plus qu'elles ne se succèdent (figure 5), plus un effort sera de courte durée et/ou d'intensité élevée, plus la fourniture d'énergie dépendra des métabolismes anaérobies, lactique et alactique, et inversement pour les efforts longs.

C'est pourquoi nous allons passer un peu plus loin en revue les moyens d'évaluation de ces filières énergétiques et discuter leur impact potentiel ou prouvé dans l'évaluation et la rééducation du sujet amputé de membre inférieur.

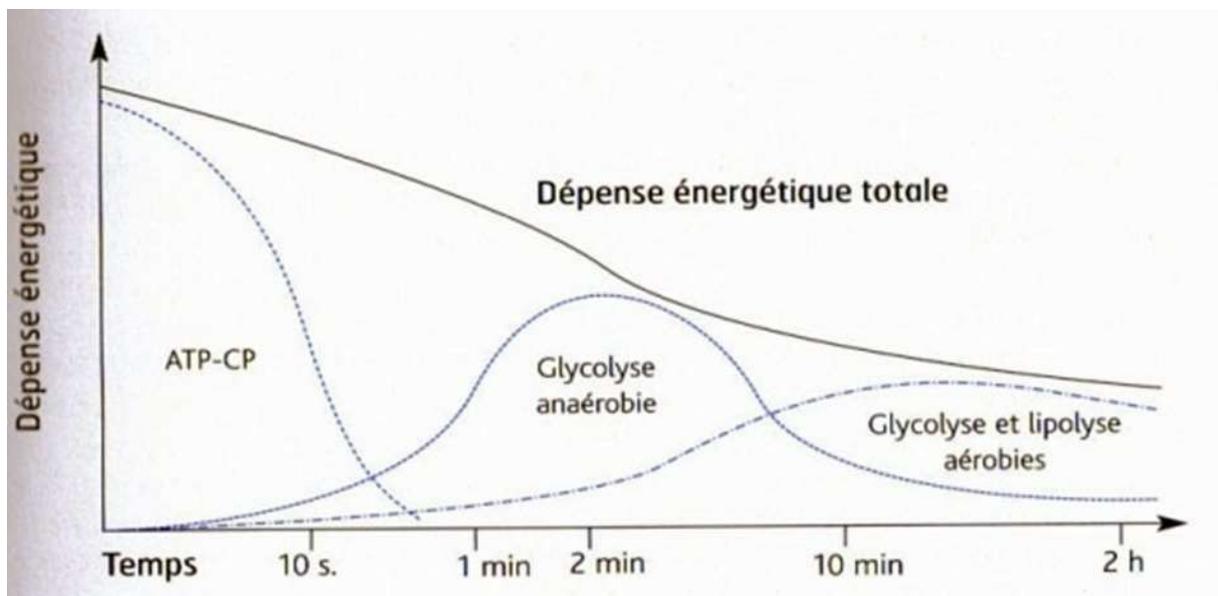


Figure 5 Mise en action des filières énergétiques en fonction de la durée d'un effort

2. Capacités aérobiees comme facteur limitant la prothésisation

Citée ci-dessus, la forme physique apparait comme associée au succès de la prothésisation. Cependant, ce terme est très vague, et dans les revues de littérature

sus-citées, il comprenait notamment la force d'extension de hanche, l'équilibre, voire les capacités cardiorespiratoires notamment le VO₂max. Dès 1987, De Cruts et al.³¹ ont montré que 70% des patients amputés trans-fémoraux développant plus de 45 watts lors d'une épreuve d'effort sur ergomètre à bras en début de rééducation pouvaient marcher sans cadre de marche, contre seulement 30% des patients qui développaient moins de 45 watts. Plus récemment, dans une revue systématique de la littérature, Sansam et al.²⁷ retrouvaient que l'atteinte d'un pic de VO₂ au moins égal à 50 % du VO₂max théorique lors d'une épreuve d'effort cardiorespiratoire réalisée avant prothésisation était prédictif de la possibilité de déambulation autonome des sujets amputés de membre inférieur. Le seuil de 60% du VO₂max théorique était retenu pour la prothésisation dans le cadre de désarticulation de hanche. En 2018, Klenow et al.³², après une revue de littérature mettant à jour celle réalisée par Sansam et al, ont proposé des recommandations pratiques pour la décision de l'appareillage ou non des sujets amputés (figure 6). En bref, les sujets présentant ou suspectés de présenter une pathologie cardiovasculaire sont orientés vers une épreuve d'effort sur ergocyclomètre unijambiste et l'appareillage est exclu si les capacités aérobies sont inférieures aux seuils susmentionnés et que la puissance maximale développée est inférieure à 30 watts.

Nous allons revenir sur plusieurs points qui expliquent la nécessité de cette évaluation cardiorespiratoire, tout d'abord l'augmentation du coût énergétique de la marche avec une prothèse de membre inférieur, les capacités aérobies diminuées du sujet amputé de membre inférieur par rapport à celles de la population générale, et enfin la vitesse de marche du sujet amputé, résultant des deux premiers points.

a. Augmentation du coût énergétique de la marche avec prothèse

La prothèse constituant un « poids mort », bien que les prothèses soient de plus en plus légères et technologiques, il est aisé de comprendre que la demande métabolique est plus importante lors de la déambulation avec prothèse comparativement à la marche valide. A cela s'ajoutent des facteurs biomécaniques qui perturbent le schéma de marche habituel. Il a notamment été retrouvé qu'en dehors de la masse de la prothèse en elle-même, c'est son caractère passif au niveau de la cheville ou du genou qui contribue grandement à l'augmentation du coût métabolique, bien que certains pieds prothétiques soient dit « à restitution d'énergie » comme le soulignent Houdijk et al.³³ ou Montgomery et al.³⁴. Dans la littérature, on retrouve un surcoût métabolique allant de 9 à 33% selon les auteurs³⁵⁻³⁷ dans le cadre des amputations trans-tibiales. Ainsi, la vitesse de marche préférentielle est habituellement diminuée chez les sujets amputés par rapport aux sujets contrôles, d'environ 10 à 42%.

Une revue systématique de la littérature publiée en 2019, par Van Schaik et al.³⁸ mettait en évidence qu'en dehors de la marche, peu d'activités de la vie quotidienne étaient évaluées d'un point de vue de la demande métabolique, et que la consommation en oxygène ainsi que la fréquence cardiaque augmentaient en fonction de la vitesse d'autant plus vite que le niveau d'amputation était proximal. Enfin, le carré de la vitesse de marche et le niveau d'amputation étaient corrélés à la consommation en oxygène.

En somme, plus la vitesse est élevée et plus le niveau d'amputation est proximal, plus la dépense énergétique à la marche est importante.

Houdijk et al.³³ retrouvaient également une vitesse de marche significativement plus faible et un coût métabolique significativement plus élevé lorsque l'amputation était de cause vasculaire et/ou de niveau trans-fémoral comparativement à une amputation de cause non-vasculaire (traumatique ou tumorale) et/ou de niveau trans-tibial.

Chez des sujets jeunes, amputés au niveau trans-fémoral, d'étiologie traumatique, le surcoût métabolique de marche était évalué entre 44 et 47% dans une étude réalisée en 2017 par Esposito et al.³⁷ à différentes vitesses de marche. La vitesse de marche préférentielle était quant à elle inférieure de 8,6% par rapport à celle des sujets contrôles, valides.

Wezenberg et al.³⁹ en 2013 ont inclus des sujets amputés de membre inférieur quel qu'en soit le niveau et ont retrouvé une consommation d'oxygène d'environ 45% supérieure à une vitesse préférentielle de marche pourtant inférieure à celle des sujets valides. Rapporté à la vitesse de marche, le coût métabolique de la marche (C_{pws} , pour *Cost at preferred walking speed*, en mL/kg/m) était alors plus élevé chez les sujets amputés par rapport aux sujets contrôles. Lors des analyses en sous-groupes, on notait que le niveau d'amputation n'influe pas sur la consommation en oxygène, mais sur la vitesse de marche, ce qui entraînait un coût métabolique de la marche d'autant plus grand que l'amputation était proximale et également d'étiologie vasculaire.

Une évaluation du coût énergétique de la marche chez le sujet amputé peut faire appel à l'index de coût physiologique (ICP), développé par Mc Gregor au début des années 1980, basé sur l'analyse de la cinétique de la fréquence cardiaque lors de la marche, dont l'utilisation est reproductible et valide chez le sujet amputé de membre inférieur

(Chin et al.⁴⁰). Hagberg et al.⁴¹ en 2007, puis Vllasoli et al. en 2015⁴², dans leurs études respectivement menée chez des sujets amputés de niveau trans-fémoral d'étiologie non vasculaire et chez des sujets amputés de niveau trans-tibial ou trans-fémoral toute cause à l'exception de la cause vasculaire, décrivaient un coût énergétique d'autant plus élevé et une vitesse de la marche spontanée d'autant plus faible que le niveau d'amputation était proximal. Chin et al.⁴⁰ a montré une corrélation entre l'index de coût physiologique et la consommation en oxygène lors de la marche avec prothèse pour amputation trans-fémorale à différentes vitesses. L'auteur concluait cependant que si l'ICP était un indice facilement mis en place lors de la rééducation, l'évaluation à l'effort avec mesure des échanges gazeux restait une évaluation plus précise du coût énergétique de la marche.

Une revue systématique de la littérature avec méta-analyse, parue en 2021 par Ettema et al.⁴³. confirme ces résultats avec un surcoût énergétique de la marche du sujet amputé allant de 12% pour les amputés de niveau trans-tibial et de cause traumatique à 105% pour les amputés de niveau trans-fémoral et de cause vasculaire.

A noter que, si la marche avec prothèse est plus coûteuse sur le plan énergétique que la marche d'un sujet sain, elle reste significativement plus économique qu'une marche avec cannes anglaises et sans prothèse, comme cela a été montré par l'équipe de Mohanty³⁵.

Par la suite, des études se sont intéressées à l'impact que pouvait avoir le choix de la prothèse, la plus légère, la plus high-tech... sur les capacités de marche, puisqu'un des moyens de diminuer le coût énergétique de la marche est d'en augmenter la vitesse, via une amélioration du rendement mécanique de la prothèse.

Jayaraman et al.⁴⁴ ont montré, dans leur étude interventionnelle randomisée contrôlée en cross-over, en 2021, que chez les sujets amputés trans-fémoraux d'étiologie vasculaire, de niveau fonctionnel K2 (selon la MCFL), l'utilisation d'un genou prothétique avec microprocesseur type C-Leg (Ottobock) permettait une augmentation significative de la vitesse de marche sur 10 mètres. Cependant, il n'existait pas de différence significative pour le test de marche de 6 minutes. Ceci était interprété par les auteurs comme le reflet d'un manque de puissance ou par le fait que sur le test de 6 minutes, le déconditionnement en endurance de ces patients amputés trans-fémoraux d'étiologie vasculaire, aux capacités fonctionnelles initialement limitées (K2 selon la MCFL) prenait le pas sur l'avantage technologique. Ceci pourrait mettre en relief les limites d'une approche exclusivement mécanique et technologique de la marche du patient amputé et l'intérêt de la coupler à une approche physiologique.

Une étude randomisée contrôlée récente européenne, par Lansade et al.¹³ a montré que chez des sujets amputés trans-fémoraux modérément actifs (périmètre de marche d'au moins 300m, mais Timed-Up and Go supérieur à 19 secondes) le port d'un genou prothétique avec microprocesseur était associé à une amélioration significative des tests fonctionnels (TUG et LCI-5), et des scores de qualité de vie, notamment la composante émotionnelle de la SF-36 (36-Item Short Form Survey)

Il existe donc des preuves qu'un appareillage plus « performant » pourrait permettre même aux sujets les plus déconditionnés, avec des capacités fonctionnelles initialement limitées d'améliorer leurs capacités de marche, et leur qualité de vie. Ce bénéfice ne semble pour autant pas suffisant pour atteindre les critères de prise en charge financière de ces prothèses en France (cf supra). Ceci témoigne d'une limite de l'approche technologique de la marche du sujet amputé, et souligne l'importance de l'évaluation des capacités fonctionnelles, à visée diagnostique mais aussi

thérapeutique et pronostique, afin d'orienter ou prioriser le travail rééducatif. C'est ce qui s'observe déjà dans la pratique courante en Médecine Physique et de Réadaptation, mais force est de constater que l'évaluation des capacités cardiorespiratoires, bien que figurant dans les recommandations de la HAS, reste un écueil de la prise en charge.

b. Diminution des capacités aérobies du sujet amputé par rapport au sujet sain

A ce surcout métabolique de la marche, inhérent à la masse inerte que représente la prothèse, s'ajoute une diminution des capacités aérobies chez les sujets amputés comparativement aux sujets valides, d'autant plus marquée chez les sujets amputés trans-fémoraux pour cause vasculaire⁴³. Les capacités aérobies s'évaluent avec précision lors d'une épreuve d'effort cardiorespiratoire avec mesure des échanges gazeux³⁰, comme décrit plus loin.

En effet, dans l'étude de Chin et al. en 2002⁴⁵, le déficit en pic de VO₂ des sujets amputés pour cause vasculaire était chiffré à 30% comparativement à des sujets contrôles sains, lors d'une épreuve d'effort incrémentale sur vélo unijambiste. Wezenberg⁴⁶ et son équipe retrouvaient également un déficit de 30% du VO₂max chez les sujets amputés de membre inférieur pour cause vasculaire, mais pas de différence significative entre sujets amputés de cause traumatique et les sujets contrôles.

Concernant l'association entre niveau d'amputation et pic de VO₂, les études divergent. En effet une étude de Daphne Wezenberg³⁹ et al. ne retrouvait pas de différence significative entre les capacités aérobies des sujets amputés au niveau trans-fémoral et trans-tibial. Les auteurs concluaient que la vitesse de marche différait entre ces deux niveaux d'amputation du fait d'une différence de rendement mécanique. Cependant une association entre niveau d'amputation capacités aérobies et de marche a été retrouvée dans la revue de littérature de Kahle et al²⁸, une fois les

facteurs confondants notamment l'âge – qui peut différer entre la population de sujets amputés de niveau trans-tibial et trans-fémoral – pris en compte.

Etant donnée la fréquente association au déconditionnement, aux comorbidités cardiovasculaires, respiratoires, métaboliques, ou autres syndromes anxiodépressifs, les épreuves d'effort peuvent ne pas être maximale. C'est pourquoi Chin et al⁴⁷. proposaient en 1997 une évaluation à l'effort basée sur l'analyse du seuil anaérobie (ou premier seuil ventilatoire, SV1), qui est un paramètre sous maximal. A l'instar du sujet insuffisant cardiaque ou respiratoire, si l'épreuve d'effort est sous-maximale, on peut également prendre en compte le pic de VO₂. Ce dernier est considéré pour certains auteurs comme un paramètre sous-maximal, en l'absence d'un véritable plateau de VO₂, c'est-à-dire l'absence d'augmentation de la consommation en oxygène malgré une augmentation de la charge de travail.

c. Conséquences sur la marche du sujet amputé

Il découle naturellement, de l'association de capacités aérobies diminuées et d'une demande métabolique plus élevée lors de la marche comparativement aux sujets valides, une diminution de la vitesse de marche ou de l'endurance à la marche. C'est ce qui a été démontré par Wezenberg et al³⁹. en 2013. En effet, la marche s'effectuait à un pourcentage du pic de VO₂ plus élevé chez les sujets amputés de cause vasculaire (79%) pour une vitesse préférentielle de marche inférieure (0,70m.s⁻¹) à celle des sujets contrôles (48%, pour une vitesse de 1,25m.s⁻¹). (Figure 7). Chez les sujets amputés pour cause traumatique, si la demande aérobie relative à la marche (49%) n'était pas différente de celle des sujets contrôles, la vitesse préférentielle de marche était significativement plus faible (0,98m.s⁻¹)

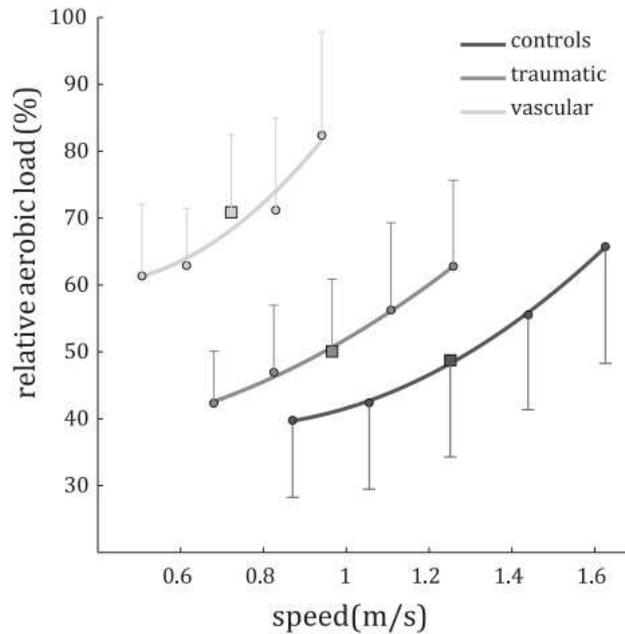


Figure 7 Pourcentage de VO₂max en fonction de la vitesse de marche, chez des sujets amputés de cause vasculaire ou traumatique et sujets contrôles, Wezenberg et al.

De plus, la vitesse théorique la plus économique sur le plan énergétique, atteignable aux alentours de 60% du VO₂max chez les sujets amputés pour cause traumatique, contre 49% du VO₂max chez les sujets contrôles n'était pas atteinte chez les sujets amputés pour cause vasculaire (figure 8). En d'autres termes, les sujets amputés pour cause vasculaire seraient contraints de marcher à une vitesse inférieure à la vitesse de marche théorique la plus économique, du fait de leur capacités aérobies diminuées, et ainsi dépenseraient plus d'énergie qu'ils ne le devraient par unité de distance.

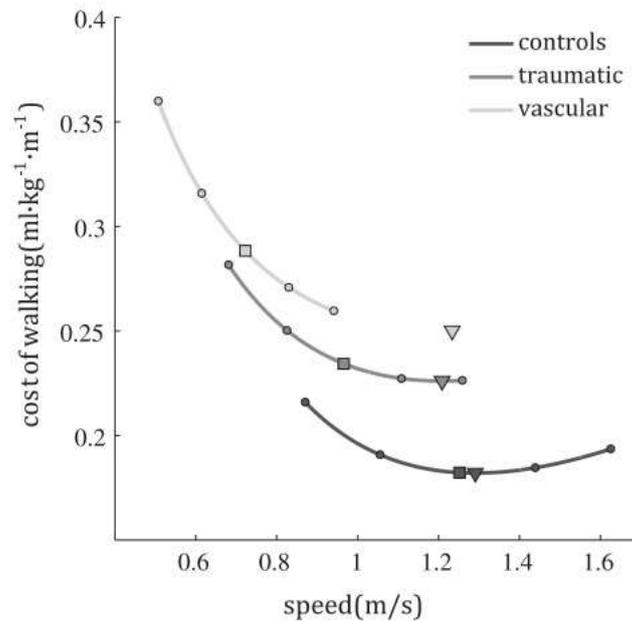


Figure 8 Coût énergétique de la marche par unité de distance, en fonction de la vitesse de marche, chez des sujets amputés de cause vasculaire ou traumatique et sujets contrôles, Wezenberg et al.

En 2018, Gjoavaag et al.⁴⁸ montraient eux aussi que la vitesse de marche préférentielle était inférieure chez le sujet amputé par rapport au sujet sain alors qu'elle se faisait à un pourcentage plus important de VO₂max. Cette vitesse était, chez l'amputé comme le sujet sain, proche d'une vitesse de switch métabolique, c'est-à-dire une vitesse au-delà de laquelle l'utilisation des glucides devenait prédominante plutôt que celle des acides gras. Ensuite, à vitesse absolue égale (0,90m.s⁻¹), correspondant à la vitesse préférentielle des sujets contrôles dans cette étude, mais à 125% de celle des sujets amputés, le substrat énergétique était à 80% glucidique, pour une intensité à 71% du VO₂max chez les sujets amputés, contre 55% et 33% respectivement chez le sujet sain. Pour les auteurs, l'utilisation majorée des glucides peut expliquer la diminution de l'endurance de marche et du périmètre de marche chez le sujet amputé, ou encore être le reflet d'une part plus importante de recrutement de la filière glycolytique anaérobie lors de la marche, pour pallier un métabolisme aérobie aux capacités limitées.

In fine, les sujets amputés notamment de cause vasculaire n'auraient pas les capacités cardiorespiratoires nécessaires pour atteindre un coût métabolique de marche optimal par unité de distance. Leur marche est plus lente, plus coûteuse en valeur absolue par rapport aux sujets sains, mais également rapportée à leurs capacités aérobies maximales, utilisant ainsi une plus grande portion de leur VO₂max. Ceci concourt, en théorie, à la limitation de l'endurance de marche du sujet amputé, voire même du choix de l'appareillage, conséquence des capacités de marche limitées.

Il s'agit donc d'un argument supplémentaire quant à la justification de l'évaluation cardiorespiratoire des sujets amputés.

Chez les sujets marchants après une prothétisation dans le cadre d'une amputation de membre inférieur, la plupart des études visant à évaluer la marche et les capacités cardiorespiratoires se tenait à distance de l'appareillage, c'est-à-dire après de nombreuses années de déambulation. Ainsi se pose la question de l'effet que l'entraînement à la marche a pu avoir sur le VO₂max et à l'inverse celui du déconditionnement progressif en lien avec la sédentarité et inactivité physique. A notre connaissance, s'il existe quelques études évaluant le lien entre capacités aérobies et la possibilité ou non d'un appareillage prothétique de membre inférieur, aucune étude n'a été réalisée de façon prospective lors de la phase pré-prothétique avec pour objectif d'établir une corrélation entre capacités aérobies et capacités de marche chez les sujets amputés et donc ne permettant pas de conclure au caractère prédictif des capacités aérobies sur la marche.

Par ailleurs, chez le sujet sain, Zhang et al.⁴⁹ ont montré – outre un pic de VO₂ plus élevé chez les sujets réalisant au moins 3 séances d'activité physique par semaine versus ceux en réalisant moins de 3 – que dans le sous-groupe de sujets s'exerçant moins de 3 fois par semaine, le nombre de pas quotidiens était corrélé au pic de VO₂

évalué sur cycloergomètre. Les auteurs émettaient alors l'hypothèse qu'il existe un effet d'entraînement même à basse intensité d'exercice.

En d'autres termes, et chez le sujet amputé, il serait intéressant de déterminer si les capacités cardiorespiratoires diminuées sont une cause ou la conséquence d'une limitation des activités physiques et de la marche avec prothèse ?

Le lien existant entre capacités aérobies maximales et vitesse de marche a été étudié dans de nombreuses pathologies, avec des résultats le plus souvent positifs. Chez les sujets âgés sains, une forte corrélation ($R=0,77$) a été montrée par Fiser et al.⁵⁰ entre capacités aérobies et vitesse de marche habituelle, dans une étude datant de 2010. En 2015, une revue systématique de la littérature⁵¹ retrouvait une corrélation considérée comme faible à modérée entre $VO_2\max$ et vitesse ou distance de marche chez les sujets ayant été victimes d'un AVC ischémique (Coefficients de corrélation entre 0,41 et 0,52), suggérant la présence d'autres limitations de la marche (déficit de contrôle moteur, troubles de l'équilibre, boiterie en lien avec l'hypertonie spastique...). Mandic et al.⁵² en 2012, ont retrouvé une forte corrélation entre ces deux mêmes paramètres chez les sujets âgés atteints de coronaropathie stable. Dans la bronchopneumopathie chronique obstructive⁵³, la corrélation entre distance de marche au test de 6 minutes et le pic de VO_2 a été montrée comme modérée.

Ceci souligne une fois de plus l'intérêt d'une évaluation cardiorespiratoire lors de la phase pré-prothétique, afin non seulement de retrouver ces facteurs de « succès » de prothésisation, mais également parmi les patients marchants, de rechercher une corrélation entre capacités cardiorespiratoires aérobie et paramètres de marche, tels que la vitesse de marche ou le périmètre de marche, ou encore lors du 2MWT (Test de marche de 2 minutes). En d'autres termes, retrouver un effet seuil, déjà démontré dans la littérature – pour rappel 60% du $VO_2\max$ théorique dans les désarticulations

de hanche, 50% du VO₂max théorique dans les amputations transfémorales ou encore une puissance développée maximale supérieure à 30 watts lors d'une épreuve cardiorespiratoire sur ergocycle en unijambiste – puis un effet dose-réponse entre capacités cardiorespiratoires et capacités de déambulation chez le sujet amputé de membre inférieur.

3. Capacités anaérobies et limitation d'activités

Du fait de l'inertie du système aérobie, c'est-à-dire le temps de recrutement efficace de cette filière énergétique, habituellement décrit aux alentours de 2 à 3 minutes³⁰, il semble que les activités de la vie quotidienne reposent également des capacités anaérobies lactiques et alactiques.

En effet, Orendurff et al.⁵⁴ se sont intéressés à la durée des efforts de la vie quotidienne chez des sujets sains (n=10) occupant un emploi de bureau. Ainsi, 40% des déplacements de la vie quotidienne comportaient 12 pas ou moins, et 97% des déplacements en comportaient moins de 99. Ce qui peut remettre en question le caractère « écologique » d'une épreuve continue incrémentale sur tapis qui fait cumuler plus de 450 pas.

De même, lors des évaluations fonctionnelles en rééducation, les tests de marche en terrain plat (TUG, test des 10 mètres) ou dans les escaliers sont de courte durée. Exception faite de l'évaluation du périmètre de marche qui peut être plus longue ou le test de marche de 6 minutes (6MWT) par exemple.

De plus, on a évoqué plus haut le fait que la marche s'effectue à des intensités relatives plus hautes chez le sujet amputé que chez le sujet sain, avec pour certains auteurs³⁹, des capacités aérobies limitant la marche et pour d'autres, un recours préférentiel aux substrats glucidiques⁴⁸. Ainsi, une intensité d'effort plus élevée associée à une durée

d'effort relativement courte fait suggérer une mise en action de la filière énergétique anaérobie plus grande chez le sujet amputé de membre inférieur que chez le sujet sain.

L'évaluation des capacités anaérobies semble donc trouver sa place au sein d'une batterie d'évaluation à l'effort, dans cette population de sujets amputés de membre inférieur.

Cependant, très peu d'études sont disponibles sur l'évaluation des capacités anaérobies des sujets amputés de membre inférieur et leur éventuel impact sur la déambulation ou autres activités. En effet, les modalités d'évaluation des capacités anaérobies restent encore non-standardisées à ce jour, y compris chez le sujet sain, d'après Krops et al⁵⁵, bien que le test de Wingate (WAnT, ci infra), soit le test le plus décrit, cf infra.

4. Capacités musculaires et limitation d'activités

Une revue narrative de la littérature en 2020, par Alex Hewson⁵⁶ et son équipe a relevé 12 articles évaluant le déficit musculaire chez les patients amputés, essentiellement de niveau trans-tibial (74% des participants) et d'étiologie vasculaire (66% des cas). Les résultats décrivaient un déficit musculaire du membre amputé par rapport au membre non amputé d'environ 40% en flexion et extension de genou pour les amputations trans-tibiales, mais également de façon assez constante un déficit de force du membre non amputé comparativement au sujet sain, de l'ordre de 35% pour la flexion et extension de genou.

Moirenfeld et al.⁵⁷ ont évalué sur dynamomètre d'isocinétisme le moment de force maximal et l'index de fatigue des muscles extenseurs et fléchisseurs du genou chez onze sujets amputés trans-tibiaux pour cause traumatique. La vitesse angulaire

retenue était de 120°/seconde pour les deux évaluations, dont le nombre de répétition différait (5 pour le moment de force maximal, 30 pour l'index de fatigue). L'index de fatigue était le pourcentage de différence entre la moyenne de travail des 10 dernières répétitions et celle des 10 premières répétitions. Même si les évaluations étaient réalisées à distance de l'amputation et chez des patients considérés excellents marcheurs, il n'y avait pas eu de freins quant à l'utilisation d'un dynamomètre d'isocinétisme chez les sujets amputés, y compris sur le membre amputé et les 11 patients inclus avaient pu réaliser cette évaluation.

En 2021, Lindsay Slater⁵⁸ et son équipe à Chicago ont montré une corrélation significative entre la distance parcourue au test de marche de 6 minutes (6MWT) et la force du quadriceps du membre sain évaluée sur isocinétisme à 120°/secondes, malgré un effectif limité (n=11). Les auteurs retrouvaient que la puissance moyenne du quadriceps sur les 6 contractions concentriques avait la plus grande corrélation avec la distance parcourue lors du test de 6 minutes, qu'elle en expliquait 77% de la variance. Par ailleurs, les auteurs notaient une corrélation négative avec la consommation en oxygène lors du test de marche de 6 minutes, suggérant une diminution du coût métabolique de la marche chez les sujets avec une force et puissance préservées aux quadriceps. Cette étude intervenant à distance de l'amputation (en moyenne 28ans), qui était de niveau trans-fémoral et l'étiologie était traumatique ou oncologique, il n'était pas possible d'écarter un effet de l'entraînement à la marche régulier sur les résultats isocinétiques ou au test de marche de 6 minutes, et les résultats pourraient différer chez les sujets amputés pour cause vasculaire, du fait d'autres déficiences métaboliques.

Elizabeth Russel Esposito et Ross H. Miller⁵⁹ ont estimé, par modélisation informatique, que le maintien de force musculaire au niveau des membres inférieurs

chez des sujets amputés de niveau trans-tibial permettrait de limiter la majoration du coût métabolique de la marche. Ils évoquaient ainsi que le coût de la marche était probablement majoré indépendamment de l'amputation chez ces sujets – les facteurs biomécaniques n'expliquant pas ce surcoût métabolique – suggérant ainsi l'intérêt d'une rééducation ciblée sur les déficiences chez les sujets amputés de membre inférieur, afin de leur permettre de meilleures capacités de marche.

Ces études, parmi de nombreuses autres, montrent l'importance du déconditionnement musculaire, et son impact sur la qualité de la marche, via l'augmentation du coût énergétique de la marche. Si certains auteurs, comme Hijmans et al.⁶⁰, discutent l'intérêt d'une rééducation pré-amputation, celle-ci semble difficile à réaliser en pratique, étant donné que l'une des étiologies principales est l'ischémie critique, comme décrit plus haut. Cependant, une évaluation objective précoce post-amputation pourrait permettre là encore une prescription individualisée du protocole de rééducation.

Au total, si le lien entre capacités aérobie, anaérobie, musculaire et capacités de marche chez le sujet amputé de membre inférieur a été établi, il n'a pas été décrit de protocole standardisé pour leur évaluation, de surcroît à la phase pré-prothétique. Par ailleurs, l'intérêt d'une telle évaluation n'a pas non plus été démontré clairement que ce soit en termes de prescription du protocole de rééducation ou en termes de possibilité d'appareillage et d'issue de la rééducation.

II. OBJECTIF :

L'objectif de cette étude est de montrer la faisabilité d'une batterie d'évaluation à l'effort des sujets amputés de membre inférieur, à la phase pré-prothétique. C'est donc

l'élaboration de cette batterie d'évaluation à l'effort ainsi que la mise en place du protocole de recherche au CHRU de Lille qui constituent l'objectif de cette thèse.

III. METHODE, MATERIEL, POPULATION

Nous avons effectué une recherche de littérature sur la base de données PUBMED, entre octobre 2019 et Juin 2022, à plusieurs reprises afin de réaliser un état des lieux des connaissances, échelles et protocoles validés pour l'évaluation des sujets amputés de membre inférieur.

A. Evaluation des capacités physiques en phase préprothétique

1. Evaluation des capacités aérobies

L'évaluation des capacités aérobies repose sur l'épreuve d'effort cardiorespiratoire idéalement avec mesure des échanges gazeux. La mesure du VO₂max est l'élément le plus communément décrit^{27,28,46,61}. Le VO₂ max, débit maximal en oxygène (ou la VO₂ max pour consommation maximale en oxygène), correspond à la quantité maximale d'oxygène que peut consommer l'organisme lors d'un effort physique. Il est le reflet des capacités maximales du système énergétique aérobie (cf supra). Cette épreuve permet également de décrire les capacités aérobies maximales : PMA pour puissance maximale aérobie, sur ergocycle, ou VMA pour vitesse maximale aérobie, sur tapis de course.

- **Du choix de l'ergomètre**

Cette évaluation peut être réalisée sur tapis de course, sur ergocycle ou sur ergomètre à bras. Il est établi que le VO₂max mesuré sera plus élevé sur tapis que sur vélo d'environ 10%, lui-même de 25% supérieur à celui mesuré sur ergomètre à bras, en lien avec une plus grande masse musculaire mobilisée³⁰.

Il existe d'autres ergomètres, tels qu'un ergomètre combiné (membres supérieurs et membres inférieurs), ou rameur, mais les contraintes cardiovasculaires, notamment tensionnelles, semblent plus importantes, avec un taux supérieur d'évènements coronariens comme rapporté dans une étude de Urhausen et al⁶². en 1994, comparativement à une évaluation sur ergocycle, probablement du fait d'une plus importante composante statique. De plus, les mouvements du haut du corps sont responsables de nombreux artéfacts sur le tracé de l'électrocardiogramme ou les relevés tensionnels.

L'évaluation la plus écologique – c'est-à-dire, celle se rapprochant le plus de la vie quotidienne – serait la marche sur terrain plat avec un dispositif portable de mesure des échanges gazeux, mais celle-ci ne pourrait avoir lieu avant prothésisation dans une population de sujets amputés de membre inférieur et pourrait être limitée, comme pour la marche sur tapis, par d'autres facteurs que les capacités aérobies du patient (équilibre notamment).

Ainsi, pour une évaluation d'effort chez le sujet amputé avant prothésisation, l'ergocyclomètre unilatéral semble le choix le plus adéquat. A noter cependant que le mouvement de pédalage n'est plus physiologique lors d'un exercice unilatéral, du fait de la part plus importante de la phase de « tirage »⁶³ (*pull phase* des anglosaxons), avec un recrutement majoré des muscles biceps femoris, rectus femoris et tibialis anterior, de 87%, 56% et 57% respectivement. Une autre étude, menée par Kohei Watanabe et al.⁶⁴ montrait également que le pédalage d'un cycliste unijambiste modifiait les activations musculaires, mesurées en électromyographie de surface, notamment du rectus femoris, biceps femoris, gastrocnemius medialis lors de la phase de tirage. Ainsi, il faudra tenir compte d'une potentielle limitation périphérique lors de

l'épreuve d'effort du fait de la biomécanique de pédalage modifiée en pédalage unilatéral.

- **Du choix du protocole**

L'épreuve d'effort cardiorespiratoire fait le plus souvent appel à une épreuve triangulaire, c'est-à-dire basée sur une augmentation progressive de la charge de travail jusqu'à atteindre les capacités maximales du sujet. Cette augmentation peut se faire en palier d'une à trois minutes, avec une augmentation de la charge (puissance sur ergocycle) de 5 à 30 watts selon le protocole. La durée et l'amplitude des paliers doivent être adaptées aux capacités attendues du sujet, afin que l'épreuve d'effort aérobie dure entre 8 et 12 minutes selon les recommandations habituelles.^{30,65}

Un autre type de protocole, discontinu cette fois, a été décrit par Wezenberg et al. en 2012⁶⁶. Celui-ci consistait en des paliers de 90 secondes, entrecoupés de 30 secondes de récupération, avec un incrément de 10W par palier. L'argument principal avancé par les auteurs pour ce protocole discontinu était le déconditionnement global des patients faisant survenir un épuisement avant l'atteinte des capacités maximales lors d'une épreuve plus conventionnelle, c'est-à-dire continue. Une des limites d'une telle évaluation est l'impossibilité ou du moins la difficulté d'évaluer des paramètres sous-maximaux tels que le seuil anaérobie ou la pente VE/VCO₂ que nous évoquerons plus loin. Ainsi ce protocole, bien que validé, n'a pas retenu notre attention.

Chez le sujet amputé, Chin et al.⁴⁷ ont proposé un protocole d'évaluation, reproductible et valide, sur ergocycle avec le membre non amputé. Il s'agissait d'un protocole continu incrémental par paliers. Chez les sujets les plus déconditionnés, un protocole en rampe, c'est-à-dire avec une augmentation de la résistance continue et non par palier (de type 1 watt toutes les 6 secondes par exemple), est souvent mieux toléré, car le

patient ne se heurte pas à l'augmentation brutale de la résistance de l'ergomètre. Il n'a pas été montré, à notre connaissance, de différence significative en termes de résultats entre un protocole par rampe et un protocole par palier, que ce soit chez le sujet sain ou le sujet pathologique (Preisser et al.⁶⁷, Bowen et al.⁶⁸). Ce protocole est détaillé plus loin.

2. Evaluation des capacités musculaires

Un effort musculaire peut être de plusieurs types : isométrique (sans changement de l'écartement entre les points d'insertion du muscle) ou anisométrique, c'est-à-dire avec un mouvement des segments osseux où s'insère le muscle. On peut distinguer les types de mouvements anisométriques selon que les points d'insertion du muscle se rapprochent – mouvement concentrique – ou qu'ils s'éloignent – mouvement excentrique. Enfin, une contraction anisométrique permettant de déplacer un segment de membre éventuellement associé à une charge physique d'un point A à un point B, on peut la quantifier en mesurant la vitesse de déplacement et/ou la charge de travail. Lorsque le mouvement s'effectue avec une charge fixe mais une vitesse libre, on parle de mouvement isotonique, et à l'inverse, lorsque le mouvement s'effectue à une vitesse donnée mais avec une charge libre, on parle de mouvement isocinétique.

La méthode d'évaluation isocinétique⁶⁹ de la force musculaire a été développée dans les années 1960 dans le cadre de la conquête spatiale, afin d'objectiver les effets de l'apesanteur. Elle a ensuite gagné le sport de haut niveau, puis la rééducation d'abord de l'appareil locomoteur, et de plus en plus les pathologies neurologiques, mais aussi cardiovasculaires... Cette méthode d'évaluation est fiable et reproductible.

Il s'agit donc d'une évaluation à vitesse constante, et imposée par le dynamomètre auto-asservi, dont la résistance s'adapte ainsi en tout point à la force développée par

le patient. La vitesse angulaire est prédéfinie par l'évaluateur, tout comme le secteur angulaire ou le nombre de répétition servant à l'évaluation.

Chez le sujet amputé, le testing musculaire isocinétique a été étudié à plusieurs reprises^{57,58,70}, tant au niveau du membre inférieur sain que du membre inférieur amputé, au niveau du genou pour les amputés trans-tibiaux ou au niveau de la hanche pour les amputés trans-fémoraux, et pour différentes étiologies, y compris vasculaires.

Dans le cadre de cette étude, nous cherchons à évaluer les sujets ayant subi une amputation majeure de membre inférieur (cf supra) durant la phase pré-prothétique. Ainsi, du fait de niveaux d'amputation différents, mais également du fait de l'état local du moignon, il semble raisonnable de ne tester que le membre non amputé. Ce choix nous impose une évaluation incomplète, puisque nous manquerons des paramètres d'intérêt tels que l'index de symétrie droite/gauche.

Selon Moirenfeld et al.⁵⁷ la vitesse angulaire la plus acceptable par les patients était celle de 120°/seconde, sur un total de 5 répétitions pour l'évaluation du moment de force maximal concentrique au niveau des extenseurs et des fléchisseurs du genou. Ce sont donc ces modalités que nous allons utiliser.

3. Evaluation des capacités anaérobies

L'évaluation anaérobie repose sur des efforts courts, classiquement d'une durée inférieure à une minute. Malgré le relatif manque d'études, et notamment l'absence de *Gold Standard* concernant l'évaluation anaérobie en pathologie, comme rapporté par Kropps et al.⁵⁵, les tests les plus utilisés sont le WAnT (Wingate Anaerobic Test) ou ses dérivés.

Le WAnT consiste en un effort maximal sur ergocycle à résistance mécanique pendant 30secondes. Sont mesurées la puissance maximale et la puissance moyenne des 30

secondes. La résistance imposée est soit calculée par rapport au poids, soit établie sur base de sprints courts maximaux réalisés au préalable sur ce même ergocycle.

Cette épreuve, selon Beneke et al.⁷¹, reflète les capacités du métabolisme anaérobie lactique, chez des rugbymen confirmés. En effet, la contribution de cette filière énergétique expliquait dans cette étude 81% de la variance de la puissance maximale et 83% de la variance de la puissance moyenne des 30 secondes.

Les résultats du test de Wingate de 30secondes chez des enfants de 7 à 14 ans atteints d'arthropathie juvénile inflammatoire⁷² montraient une meilleure corrélation avec la participation aux activités de la vie quotidienne que les résultats d'une épreuve aérobie (PMA et VO2max).

Certains auteurs se sont intéressés à l'élaboration d'une épreuve permettant à la fois d'évaluer le métabolisme aérobie et anaérobie, en allongeant le Wingate Test à 60secondes, chez des cyclistes de niveau confirmé⁷³. Cependant, le VO2 à la fin des 60 secondes n'atteignait que 90,7% (+/- 5,3%) du VO2max mesuré sur protocole incrémental, et n'était pas significativement différent du VO2 à la fin du Wingate traditionnel de 30 secondes. Ainsi, il ne semble pas utile de rallonger l'effort d'une épreuve anaérobie au-delà de 30 secondes, car l'évaluation anaérobie est rendue plus difficile et cela ne permet pas de supplanter l'évaluation aérobie « classique ».

Cependant, de telles épreuves, bien qu'idéales en théorie pour l'évaluation anaérobie, ne semblent être réalisables ou acceptables chez des patients amputés de membre inférieur, du fait de leur intensité (Wingate Anaerobic Test) notamment si l'étiologie est vasculaire, à l'instar d'autres pathologies chroniques comme la BPCO ou l'insuffisance cardiaque. Ces évaluations sur ergocycle sont également peu écologiques.

C'est pourquoi des auteurs se sont intéressés à des tests de terrain, comme le Margaria Test ou le SFST (Short and Fast Step Test). Le Margaria Test⁷⁴, développé dans les années 70 repose sur le calcul de la puissance développée pour monter en courant des escaliers, à partir du poids du patient, la hauteur des marches et de la vitesse. Le facteur limitant principal étant la nécessité d'un équilibre et d'une coordination permettant la course dans les escaliers, ce qui n'est pas réalisable chez des sujets amputés de membre inférieur, ce d'autant que l'évaluation se voudrait précoce.

Le SFST⁷⁵, développé récemment par une équipe dijonnaise, repose sur la montée et descente d'une marche de 17,5cm, sans courir, un maximum de fois pendant 1 minute. Chez les sujets sains, ce test a une bonne reproductibilité, et permet une bonne évaluation des capacités anaérobie, illustrée par la majoration des lactates sanguins, de la dette en oxygène (mesurée par l'EPOC, Excess Post-exercise Oxygen Consumption). Si cette évaluation est moins exigeante que le Margaria test, de surcroit faisable et sécuritaire chez les sujets atteints de coronaropathie⁷⁶, elle n'en demeurerait pas moins difficile de réalisation chez nos patients amputés, qui plus est lors de la phase pré-prothétique.

Au total, l'évaluation anaérobie doit reposer sur une épreuve standardisée, d'une durée de 20 à 30 secondes, dont l'intensité est acceptable et raisonnable pour ces patients fragiles, et dont la technicité est faible, et qui ne nécessite que le membre non amputé.

Ainsi, une évaluation isocinétique semble trouver sa place. Ce d'autant qu'un protocole de fatigabilité, basé sur 30 répétitions concentriques de flexion et extension de genou à une vitesse de 90 à 180 °/seconde, a montré une bonne reproductibilité, chez des sujets sains et chez des sujets atteints de BPCO⁷⁷. De plus, le travail total des

extenseurs du genou est corrélé au travail total lors d'un test Wingate, chez des sujets cyclistes de niveau national, avec un coefficient de corrélation de 0,83 d'après Bosquet et al.⁷⁸. La durée d'une telle épreuve à une vitesse angulaire de 180°/seconde serait d'environ 30 secondes, soit la durée habituelle, décrite et recommandée, d'un test anaérobie.

Cependant, dans leur étude menée chez le sujet amputé de membre inférieur (de niveau trans-tibial et d'étiologie traumatique), Moirenfeld et al.⁵⁷ ont établi que la vitesse de 120°/seconde (2,1rad/seconde) était la mieux tolérée, que ce soit pour l'évaluation du moment de force maximal, le travail total ou de l'index de fatigabilité sur 30 répétitions.

Un test similaire mené chez des femmes indemnes de toute pathologie⁷⁹ a montré une excellente reproductibilité du travail total en flexion comme en extension de genou, et une bonne reproductibilité du travail total lors du premier tiers de l'épreuve ainsi que du dernier tiers pour l'extension de genou.

Cependant, Paulus et al.⁸⁰ ont montré que l'index de fatigue au niveau des extenseurs et des fléchisseurs du genou n'avait pas une reproductibilité intra-dynamométrique suffisante et donc ne devait pas être un paramètre d'intérêt que ce soit dans un contexte clinique ou de recherche. Les auteurs conseillaient d'utiliser préférentiellement le travail total.

Pour ces raisons, le choix d'une évaluation anaérobie sur isocinétisme, sur 30 mouvements réciproques de flexion-extension de genou du côté sain, à 120 °/sec semble adaptée chez les sujets amputés de membre inférieur. De plus, celle-ci-pourra être faite dans le même temps d'évaluation que l'évaluation musculaire maximale (cf supra).

B. Evaluation des capacités de marche du sujet amputé de membre inférieur à l'issue de la rééducation

Les capacités de marche peuvent être décrites de façon quantitative, lors de l'évaluation de la vitesse de marche, à partir de la mesure d'un temps pour réaliser une distance donnée ou d'une distance réalisée sur une durée définie. Il faudra également prendre en considération la nécessité ou non d'une aide technique (cane simple, canne anglaise, déambulateur deux roues voire quatre ou cadre de marche), car celle-ci modifie le coût énergétique de la marche³³.

1. Evaluation quantitative des capacités de marche

L'évaluation quantitative des capacités de marche en rééducation est dérivée historiquement des tests de course de terrain, notamment le test de course de 12 minutes décrit par Cooper et al. initialement pour évaluer les capacités aérobie des militaires américains. Ce test a ensuite été décliné en une version marchante pour les patients atteints de BPCO (McGavin, 1976⁸¹) ne pouvant pas courir. Ce test de 12 minutes sous maximal avait d'ailleurs été montré comme corrélé significativement aux capacités aérobies évaluées sur ergocyclomètre (VO_{2pic}). Par la suite, ce test de marche raccourci à un test de 6 minutes⁸² qui est aujourd'hui très largement décrit, utilisé et validé, et ce, dans de très nombreuses pathologies et situations cliniques.

Le Test de marche de 6 minutes a en effet démontré une excellente reproductibilité chez les sujets amputés trans-tibiaux de cause traumatique ou vasculaire⁸³. L'un des arguments principaux pour ce test de marche est la distance qu'il permet d'évaluer, correspondant notamment environ à celle nécessaire lors des déplacements dans un supermarché (132 à 342m). Les résultats de ce test de marche ont montré une excellente corrélation avec les capacités fonctionnelles, comme les différentes classes de la MCFL (K0 à K4, cf infra). Sur le plan pratique, Linberg et al.⁸⁴ ont proposé une

adaptation des recommandations de l'ATS (American Thoracic Society) pour la réalisation de ce test chez le sujet amputé de membre inférieur, à l'instar des adaptations réalisées chez les sujets cérébrolésés (Mossberg et Fortini⁸⁵). En effet, le 6MWT, habituellement décrit sur une ligne droite de 30 mètres avec demi-tour, était adapté pour éviter le demi-tour en pivot à chaque extrémité et garder la cadence de marche sur un demi-tour en arc de cercle, grâce à un couloir de 1,83m de large (6ft), sur une longueur de 30 mètres. En 2013, Linberg et al⁸⁴ ont montré que chez des vétérans de l'armée américaine, il existait une différence significative de distance parcourue au test de 6 minutes entre les sujets non amputés (760m en moyenne) et amputés ($p < 0,01$), mais également entre les sujets amputés de niveau trans-tibial (660m en moyenne) et les niveaux plus proximaux d'amputation.

Le Test de marche de 2 minutes (2MWT) est une alternative utile au 6MWT chez le sujet amputé. Etant donné le périmètre de marche qui peut être très limité chez ces sujets, la diminution de la durée d'évaluation par rapport au test de 6 minutes permet en théorie à un plus grand nombre de sujet d'y parvenir. Le test de 2 minutes a montré une excellente corrélation avec les résultats du test de 6 minutes dans de nombreuses pathologies comme les pathologies neuromusculaires⁸⁶, la broncho-pneumopathie obstructive chronique sévère⁸⁷ ou encore la sclérose en plaques⁸⁸. Ce test a montré une excellente reproductibilité⁸⁹ intra et inter-évaluateur chez le sujet amputé de membre inférieur de niveau transtibial. Grémeaux et al.⁹⁰, en 2012, ont montré que le test de marche de 2 minutes, évalué en fin de rééducation, après livraison de la prothèse définitive, permettait de distinguer les patients amputés présentant des limitations à la déambulation (évaluée par l'échelle de Houghton) de ceux qui n'en présentaient pas, avec une valeur seuil comprise entre 130 et 150 mètres. L'aire sous la courbe avec ces seuils était de 0,93 (0,83-0,97). Une revue systématique de la

littérature, en 2014, par Pin et al.⁹¹ retrouvait une excellente reproductibilité intra (ICC 0,90-0,96) et inter-évaluateur (ICC 0,98-0,99), ainsi qu'une excellente reproductibilité test-retest (ICC95 0,71-0,90).

Concernant le déroulé de ce test, dans la majorité des études le décrivant, un essai doit être réalisé dans la semaine précédente, afin que le sujet puisse se familiariser avec la durée de l'effort et sa gestion, les consignes doivent être énoncées avant le test, et aucun encouragement n'est donné par l'évaluateur qui doit marcher derrière le sujet.

En 2020, Gaunard et al.⁹². ont publié des données à but normatif en fonction des niveaux de mobilité selon la MCFL (cf infra). Il existait une différence significative de distance parcourue en fonction du niveau de mobilité avec des valeurs de 81,7 mètres pour les patients classés K2, 138,4 mètres pour les patients classés K3 et 177,9mètres pour les patients classés K4. Il existait également une différence significative de distance parcourue entre les sujets âgés de plus de 70 ans (moyenne 98,3mètres +/- 35) et les différents groupes d'âge inférieur. Les autres facteurs influençant la distance parcourue étaient l'étiologie (maladie, dont diabète, AOMI ou infection, versus traumatique ou tumorale), le niveau d'amputation (trans-fémoral versus trans-tibial) et une classification de risque de morbidité, basée sur le ratio du tour de taille sur la taille du sujet.

De plus, une étude par Parker et al. en 2010⁹³, a pu montrer que les performances réalisées par 52 sujets amputés de membre inférieur lors du test de marche de 2 minutes étaient associées de manière significative avec le niveau d'activité quotidien, en termes de nombre de pas, mesuré par des podomètres.

Le Test de marche de 10 mètres permet d'évaluer la vitesse préférentielle de marche du sujet amputé. Ce test s'est montré valide et reproductible dans cette pathologie, notamment, comme beaucoup d'échelles initialement chez le sujet amputé trans-tibial de cause traumatique⁹⁴. La vitesse de marche évaluée par ce test était corrélée significativement à la classification de la déambulation selon la MFCL dans une étude menée par R.Batten et al en 2019⁹⁵. Plus la vitesse de marche était élevée, meilleures étaient les capacités de déambulation, soulignant l'intérêt de ce test des 10 mètres, ce d'autant qu'il s'agit d'un test dont la mise en place est aisée.

Le Timed-Up and Go test (TUG) est un test facile de mise en place, permettant d'évaluer la marche, mais aussi le transfert assis-debout ainsi que le demi-tour. Ce test chronométré se déroule comme suit : le sujet est assis sur une chaise avec accoudoirs, doit se lever, marcher 3 mètres, faire demi-tour, et venir s'asseoir à nouveau. Il s'agit d'un test quantitatif puisque c'est le temps nécessaire pour réaliser le test qui est relevé. Le TUG a été validé dans la population de sujets amputés de membre inférieur et est préférentiellement utilisé pour évaluer le risque de chute des patients plutôt que pour évaluer les performances de marche seules. Lansade et al.⁹⁶ en 2018, ont d'ailleurs montré que l'utilisation d'un genou prothétique avec micro-processeur était associée à une réduction significative du temps au TUG, et ainsi à une diminution du risque de chute.

2. Evaluation qualitative des capacités de marche

Il est également possible d'évaluer qualitativement les capacités de marche des patients, et de nombreuses échelles ont été élaborées dans ce sens. Nous nous intéresserons principalement aux échelles validées en langue française chez le sujet amputé majeur de membre inférieur.

La **MIF (Mesure d'Indépendance Fonctionnelle)**, échelle générique d'évaluation des limitations d'activité, plus précisément son sous-score moteur, en fin de rééducation a été montré comme associé au succès ou non de la prothésisation. Cette échelle ne s'est cependant pas montrée prédictive de l'issue de la rééducation chez le sujet amputé, lorsqu'elle était évaluée en début de prise en charge, c'est-à-dire lors de la phase pré-prothétique. Notons par ailleurs que le sous-score moteur comporte une évaluation des transferts, de la locomotion mais également du contrôle des sphincters et de la réalisation des soins personnels et n'est donc pas spécifique de la marche.

La **MFCL (Medicare Functional Classification Levels)** permet de classer les patients selon leur déambulation afin de déterminer la prescription et la prise en charge financière de l'appareillage aux Etats-Unis. Il existe 5 niveaux, allant de 0, pour les patients dont le port de prothèse ne permettrait pas même d'améliorer l'autonomie aux transferts, à 4, pour les patients dont les capacités excèdent celles d'une déambulation normale, sans aide technique (telle que la pratique d'un sport). Cette échelle n'est pas validée en langue française, mais est fréquemment utilisée dans la littérature internationale.

L'échelle **SIGAM dont une version française (SIGAM-Fr)** a été validée transculturellement par une équipe dijonnaise en 2015⁹⁷, se présente sous la forme d'un questionnaire, et ainsi la présence de troubles cognitifs (MMSE<23) ou de barrière de la langue sont des freins majeurs à son utilisation. Notons que cette échelle a été validée chez des sujets portant une prothèse depuis au moins 6 mois⁹⁸, ainsi elle permettra une classification fonctionnelle des patients à distance du séjour de rééducation. Elle est sensible aux résultats de l'HADS (Hospital Anxiety and Depression Scale) ou encore à la présence de douleurs du membre fantôme, qu'il faudra donc prendre en compte. Cette échelle permet de classer les patients selon

leur niveau fonctionnel en 6 grades de 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.

L'échelle de Houghton⁹⁹ est une autre échelle validée¹⁰⁰ chez le sujet amputé de membre inférieur, sensible au changement, sans effet plafond ni effet seuil, avec une très bonne fiabilité. Cette échelle repose sur un questionnaire comportant 4 items, portant sur l'utilisation de la prothèse dans la vie quotidienne. Tout comme l'échelle SIGAM-fr, elle ne peut donc être utilisée que pour les patients ayant déjà pu retourner à domicile. A noter que Devlin et al.¹⁰¹, en 2004, considéraient que la suppression du 4ème item portant sur l'instabilité ressentie du patient lors de la marche permettait une majoration de la taille d'effet entre la fin de prise en charge et le suivi, ce 4ème item étant moins sensible au changement que les trois autres.

1/Portez-vous votre prothèse	Cotation
A. Moins de 25% du temps de marche (1 à 3h)	0 pts
B. Entre 25 et 50 % (4 à 8h)	1 pts
C. Plus de 50 % du temps de marche (12 à 16 h)	2 pts
D. Pendant tous les déplacements du temps d'éveil	3 pts
2/Utilisation de la prothèse à la marche	
A. Juste pour aller chez le médecin ou en CRF	0
B. À la maison	1
C. Occasionnellement à l'extérieur	2
D. À l'intérieur et à l'extérieur de la maison	3
3/ En extérieur	
A. Utilisation de la prothèse au fauteuil roulant	0
B. Prothèse utilisé avec 2 cannes ou un déambulateur	1
C. Prothèse utilisé avec 1 canne	2
D. Prothèse utilisé sans aide	3
4/Type de marche extérieure, le sujet se sent il instable ?	
A. Marche en surface plate oui/non	-1
B. Montée et descente escalier oui/non	-1
C. Marche sur terrain irrégulier oui/non	-1
Total	

Figure 9 Echelle de Houghton

L'échelle PPA (Prosthetic Profile of the Amputee),¹⁰² est une échelle spécifique d'évaluation de limitation d'activité chez le sujet amputé de membre inférieur. Il s'agit d'une échelle utilisable dans le suivi des patients, mais elle a été utilisée dans plusieurs études en fin de premier séjour de rééducation. Le sous score d'index de capacités locomotrice (PPA-LCI)¹⁰³ a également été validé. Leurs caractéristiques psychométriques ont été évaluées par leurs auteurs, et ont montré une bonne validité de construct, une bonne reproductibilité, à noter qu'il existait un effet plafond chez les sujets les plus autonomes.

L'échelle LCI-5¹⁰⁴ est une évolution de l'échelle PPA-LCI (Prosthetic Profile of the Amputee – Locomotor Capabilities Index). L'échelle LCI comportait initialement 14 items portant sur des activités locomotrices, pour lesquelles le patient cotait selon une

échelle de 4 niveaux (0-3). L'échelle LCI-5 reprend ces 14 items, mais en développant 5 niveaux de cotation (*0 : Non ; 1 Oui si quelqu'un m'aide ; 2 : Oui si quelqu'un est près de moi ; 3 : Oui seul avec des aides techniques ; 4 : Oui seul et sans aide technique*). Le score peut donc varier de 0 à 56 points. Cette échelle présente l'intérêt d'être simple d'utilisation, en étant un auto-questionnaire relativement court (en moyenne 9 minutes). A notre connaissance, il n'existe à ce jour pas de version validée en langue française de l'échelle LCI-5 malgré une excellente reproductibilité et fiabilité dans sa version anglophone ainsi qu'un effet plafond bien moindre que l'échelle LCI originelle.

Au total, au vu de la validité en langue française de ces échelles et de leur pertinence dans le cadre de notre étude, le choix s'est porté sur la réalisation du test de marche de deux minutes (2MWT), le timed-up and go (TUG) pour l'aspect quantitatif permettant à un maximum de sujets amputés de réaliser ces tests de durée relativement courte, ainsi que de l'échelle SIGAM pour l'évaluation qualitative qui distingue 6 catégories de patients (cf Annexe), contre 3 par l'échelle de Houghton et le Prosthetic Profile of the Amputee (PPA), pour l'évaluation des limitations d'activités en lien avec la déambulation.

IV. RESULTATS

Proposition d'un protocole d'évaluation des capacités physiques aérobies, anaérobies et musculaires des sujets amputés de membre inférieur à la phase pré-prothétique

A. Population

Critères d'inclusion :

- Hommes ou femmes
- Age : 18 à 75 ans.
- Amputation unilatérale majeure de membre inférieur : amputation trans-tibiale, désarticulation de genou, amputation trans-fémorale, désarticulation de hanche, amputation trans-iliolombaire
- Toutes causes : vasculaire (artériopathie oblitérante des membres inférieurs), traumatique, néoplasique, infectieuse...
- N'ayant jamais encore porté de prothèse de membre inférieur, ni marché avec un tel appareillage.

Critères de non-inclusion :

- Sujets amputés mineurs ou âgés de plus de 75ans
- Sujets ayant subi une amputation mineure d'un membre inférieur (*ie* d'un niveau plus distal que le niveau trans-tibial)
- Sujets ayant subi une amputation bilatérale
- Sujets amputés ayant déjà porté une prothèse de membre inférieur

Critères d'exclusion :

- Pathologie cardiovasculaire décompensée ou instable :
 - Insuffisance cardiaque non stabilisée, sténose aortique serrée ou symptomatique, cardiomyopathie hypertrophique, maladie thromboembolique veineuse récente, hypertension artérielle pulmonaire sévère, myocardite ou péricardite aiguë
 - Hypertension artérielle sévère non équilibrée
 - Coronaropathie connue en attente de prise en charge, syndrome coronarien aigu de moins de 5 jours
 - Artériopathie oblitérante du membre non amputé de stade III ou IV selon Leriche et Fontaine (douleurs de décubitus ou troubles trophiques)
- Pathologie respiratoire décompensée ou instable
 - Exacerbation d'asthme ou de BPCO (BronchoPneumopathie Chronique Obstructive)
 - Hypoxémie au repos en air ambiant avec $SaO_2 < 85\%$
- Tout antécédent de pathologie neurologique centrale ou périphérique surajoutée pouvant modifier les résultats de l'épreuve d'effort (à l'exception de la polyneuropathie diabétique)
- Contre-indications selon les recommandations de l'ATS/ACCP 2003 (American Thoracic Society / American College of Chest Physician)
- A noter que tout épisode infectieux, toute décompensation d'organe fera différer les différents temps d'évaluation, il en est de même pour les autres problématiques médicales aiguës, dont l'appréciation sera laissée au médecin en charge du patient.

TABLE 8. ABSOLUTE AND RELATIVE CONTRAINDICATIONS FOR CARDIOPULMONARY EXERCISE TESTING

Absolute	Relative
Acute myocardial infarction (3–5 days)	Left main coronary stenosis or its equivalent
Unstable angina	Moderate stenotic valvular heart disease
Uncontrolled arrhythmias causing symptoms or hemodynamic compromise	Severe untreated arterial hypertension at rest (> 200 mm Hg systolic, > 120 mm Hg diastolic)
Syncope	Tachyarrhythmias or bradyarrhythmias
Active endocarditis	High-degree atrioventricular block
Acute myocarditis or pericarditis	Hypertrophic cardiomyopathy
Symptomatic severe aortic stenosis	Significant pulmonary hypertension
Uncontrolled heart failure	Advanced or complicated pregnancy
Acute pulmonary embolus or pulmonary infarction	Electrolyte abnormalities
Thrombosis of lower extremities	Orthopedic impairment that compromises exercise performance
Suspected dissecting aneurysm	
Uncontrolled asthma	
Pulmonary edema	
Room air desaturation at rest \leq 85%*	
Respiratory failure	
Acute noncardiopulmonary disorder that may affect exercise performance or be aggravated by exercise (i.e. infection, renal failure, thyrotoxicosis)	
Mental impairment leading to inability to cooperate	

Adapted by permission from References 10, 43, and 295.
* Exercise patient with supplemental O₂.

Figure 10 Contre-indications absolues et relatives à l'épreuve d'effort, d'après l'ATS / ACCP

B. Protocole

1. Evaluation aérobie

Avant l'épreuve d'effort seront réalisés les mesures et calculs suivants :

- Préciser la présence de traitements bradycardisants (bêtabloquants, amiodarone, inhibiteurs calciques bradycardisants...)
- Interrogatoire et examen clinique à la recherche de contre-indications à la réalisation de l'épreuve d'effort.
- Electrocardiogramme (ECG) de repos
- Spirométrie pour mesure du VEMS et calcul de la VMM (Ventilation minute maximale) à l'aide de la formule : $VMM = 35 \times VEMS$
- Calcul de la VO₂max théorique (L/min et L/min/kg) selon Wasserman¹⁰⁵

Installation et mise en place du protocole :

- Installation d'après Chin et al.⁴⁷ : assis avec dossier semi-incliné à 45°, pédalage avec le membre non amputé uniquement.

- Protocole : continu triangulaire en rampe
 - Avant le début de l'épreuve : RER < 0,85, stabilisation du VO₂ et de la fréquence cardiaque
 - Echauffement de 3 minutes avec charge vide
 - Puissance initiale de 20 watts puis incrément en rampe de 6 à 12w par minute selon les capacités attendues du sujet, laissé à l'appréciation de l'évaluateur (soit 1 watt toutes les 5 à 10 secondes)
 - Cadence de pédalage autour de 60 cycles/ min
 - Encouragements autorisés.

Pendant l'épreuve :

- Paramètres mesurés et calculés :
 - Effort perçu : échelle de Borg modifiée 0-10
 - ECG continu : fréquence cardiaque, surveillance de la repolarisation, de l'apparition de troubles de conduction ou du rythme à l'effort.
 - Mesure de la pression artérielle (PA, en mmHg) avant l'épreuve, toutes les 2 minutes et à la fin de celle-ci
 - Mesure des échanges gazeux :
 - Ventilation minute (VE)
 - Consommation en dioxygène (VO₂) en valeur absolue (L/min) et rapportée à la masse corporelle du sujet (mL/min/kg)
 - Calcul de l'équivalent respiratoire en dioxygène VE/VO₂
 - Mesure de la production de dioxyde de carbone (VCO₂) en valeur absolue et rapportée à la masse corporelle du sujet.
 - Calcul de l'équivalent respiratoire en dioxyde de carbone :
VE/VCO₂

- Les capacités aérobies maximales seront définies par la mesure de la consommation maximale en dioxygène (VO_{2max}) qui est définie comme suit : absence d'augmentation ou augmentation du VO_2 inférieure à 150mL/min malgré une augmentation de la puissance développée.
 - En l'absence de plateau de VO_2 : le pic de VO_2 sera utilisé comme paramètre maximal, défini comme la plus haute valeur de consommation en oxygène durant l'épreuve d'effort.
- Le seuil anaérobie (AT, anaerobic threshold) ou premier seuil ventilatoire pourra être calculé selon deux méthodes comme recommandé par l'ATS/ACCP :
 - Méthode des équivalents ventilatoires : le seuil anaérobie correspond au nadir de la courbe VE/VO_2 en fonction de VO_2 .
 - Cassure dans la courbe du VE/VO_2 sans cassure de la courbe VE/VCO_2
 - Ventilation minute (VE en L/min) et calcul de la réserve ventilatoire en pourcentage de la VMM ($RV = VE/VMM \times 100$)
- Calcul des équivalents respiratoires :
 - RER : VCO_2 / VO_2
 - Equivalent en dioxygène = VE/VO_2
 - Equivalent en dioxyde de carbone : VE/VCO_2 et pente du rapport VE/VCO_2
- Puissance développée (en watts) : puissance au seuil anaérobie et puissance maximale aérobie, définie comme la plus petite puissance permettant d'atteindre la consommation maximale en O_2 (VO_{2max} ou VO_2 pic)

- Critères de maximalité : l'atteinte d'au moins deux de ces critères permet d'affirmer que l'épreuve d'effort aura été maximale.
 - RER > 1,1
 - Plateau de VO₂ ou atteinte du VO₂max théorique comme décrit ci-dessus
 - Epuisement du sujet
 - Fréquence cardiaque supérieure à 90% de la fréquence cardiaque maximale théorique (220-âge)
- Critères d'arrêt : La présence d'un seul de ces critères fera stopper l'épreuve d'effort, quel que soit le niveau d'effort atteint et les résultats ne seront pas interprétables, des examens complémentaires et une prise en charge spécifique pourront être indiqués.
 - Douleurs musculaires intenses
 - Douleur thoracique
 - Anomalies électrocardiographiques telles qu'une anomalie de la repolarisation, des troubles du rythme ventriculaires menaçants (tachycardie ventriculaire non soutenue ou soutenue, triplets ventriculaires polymorphes)
 - Baisse brutale du pouls d'oxygène (VO₂/FC)

2. Evaluation anaérobie et musculaire sur dynamomètre d'isocinétisme

L'évaluation anaérobie ainsi que l'évaluation musculaire seront réalisées sur dynamomètre d'isocinétisme et portera exclusivement sur le membre inférieur non amputé.

Le dossier sera incliné à 85°, le creux poplité du sujet à 3 travers de doigt de l'assise, l'axe du dynamomètre sera centré sur l'axe articulaire du genou, le haut du corps sera

maintenu avec des ceintures, les bras croisés sur la poitrine, il n'y aura pas de contre-appui pour le membre controlatéral (ie amputé) pour permettre les mêmes conditions quel que soit le niveau de l'amputation. L'amplitude articulaire choisie sera de 90° de flexion à 0° d'extension. Nous prendrons en compte la correction de gravité pour chaque évaluation.

a. Evaluation du Moment de Force Maximal (MFM) :

- Le test sera précédé d'un échauffement sur ergocycle fauteuil à intensité légère progressivement modérée durant 5 à 10 minutes puis 3 à 5 mouvements concentriques réciproques sur isocinétisme pour que le patient se familiarise avec la vitesse et les consignes.
- Le test comportera 5 mouvements concentriques réciproques de flexion-extension de genou, à une vitesse angulaire de 120 degrés par seconde, à intensité maximale avec des encouragements verbaux par l'évaluateur.
- Mesures :
 - Coefficient de variation des mesures inférieur à 10%, qui est un prérequis indispensable à l'interprétation des valeurs.
 - Moment de force maximal (MFM) des fléchisseurs et extenseurs de genou, en Nm.

b. Evaluation anaérobie :

- Réalisée après récupération d'au moins 5 minutes après l'évaluation de la force maximale
- 30 mouvements concentriques réciproques de flexion-extension de genou à 120 degrés par seconde du côté non-amputé.
- Mesure du travail total (en joules)

c. Tests de marche à l'issue de la rééducation

- **2MWT (test de marche de 2 minutes)**

Le patient est informé avant le test qu'il devra marcher aussi vite que possible durant deux minutes, qu'il pourra ralentir si nécessaire, voire s'arrêter mais devra reprendre la marche dès qu'il s'en sentira à nouveau capable. La passation du test sera réalisée par un kinésithérapeute entraîné, qui restera derrière le patient. Les encouragements ne sont pas autorisés après l'énoncé des consignes. L'échelle de Borg modifiée (0-10) permettra d'apprécier le niveau d'inconfort du patient. On relèvera la fréquence cardiaque avant et à la fin du test, ainsi qu'après une minute de récupération.

Etant donné les critères de prise en charge de certains appareillages par la sécurité sociale en France, nous relèverons également le périmètre de marche en continu de ces patients.

- **Timed-up-and-go (TUG)**

Le patient débutera le test assis sur une chaise avec accoudoirs. Le patient pourra avoir les mains sur les accoudoirs et/ou tenir son aide technique habituelle avant de se lever. Le chronométrage sera lancé lorsque le patient initie le mouvement. Il devra se lever, marcher 3 mètres en ligne droite, effectuer un demi-tour, puis revenir s'asseoir. Le chronomètre sera arrêté dès lors qu'il y aura contact avec l'assise de la chaise. Le point de demi-tour sera matérialisé par une croix au sol.

- **Evaluation qualitative de la marche :**

Cette évaluation qualitative fera appel à l'échelle SIGAM, dans sa version traduite en Français (SIGAM-fr⁹⁷). Cette échelle permet d'apprécier le niveau d'utilisation de la prothèse de membre inférieur par le patient, en rééducation, en déambulation en milieu

intérieur, en milieu extérieur ainsi que de la nécessité ou non d'utilisation d'aides techniques. *Voir annexe*

d. Schéma de l'étude :

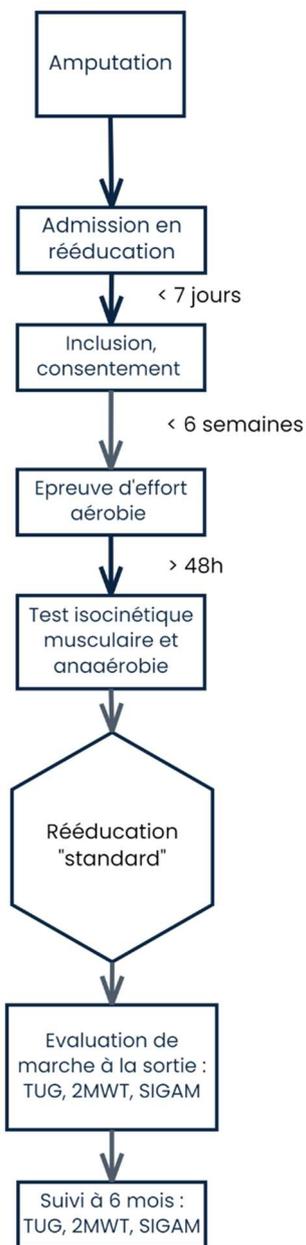


Figure 11 Plan expérimental

C. Objectif

1. Principal : faisabilité du protocole

Notre étude aura pour objectif principal l'évaluation de la faisabilité d'une batterie d'évaluation des capacités physiques maximales aérobies, anaérobies et musculaires de sujets amputés de membre inférieur à la phase pré-prothétique.

Notre critère de jugement principal sera la fréquence de sujets ayant pu réaliser la totalité des tests de la batterie.

2. Secondaires :

- Objectif secondaire n°1 :

Nous nous intéresserons à la fréquence de survenue des effets indésirables ou de la non-complétion de la batterie d'évaluation, et nous décrirons ces évènements.

- Objectif secondaire n°2 :

Nous décrirons les résultats de la batterie d'évaluation aérobie, anaérobie et musculaire, et nous comparerons aux données présentes dans la littérature. Les critères de jugement seront les suivants :

- Pour l'épreuve aérobie nous nous intéresserons au pic de VO₂ (pic de consommation en dioxygène lors de l'épreuve d'effort en mL/min/kg), à la puissance maximale aérobie (plus petite puissance permettant d'atteindre le pic de VO₂), et au seuil anaérobie (défini comme la cassure dans la courbe de l'équivalent en O₂ (VE/VO₂) sans cassure de la courbe de l'équivalent en CO₂ (VE/VCO₂)).
- Pour l'évaluation anaérobie, la variable d'intérêt sera le travail total sur les 30 répétitions de contractions réciproques concentriques, mesuré pour les fléchisseurs et les extenseurs du genou du membre non amputé

- Pour l'évaluation musculaire, le critère de jugement sera le moment de force maximal (MFM) des extenseurs et des fléchisseurs du genou du membre non amputé.

- Objectif secondaire n°3 :

Nous décrirons les capacités de marche des sujets amputés de membre inférieur à l'issue d'un séjour de rééducation standard dans nos services ainsi que 6 mois après la fin du séjour de rééducation.

Les critères de jugement seront la distance parcourue lors du test de marche de 2 minute (2MWT), le temps réalisé lors du TUG (Timed Up and Go), ainsi que le grade SIGAM-Fr.

- Objectif secondaire n°4

Nous chercherons dans un dernier temps à montrer une corrélation entre les capacités physiques évaluées en phase pré-prothétique (ie VO₂pic à l'épreuve aérobique, travail total lors de l'épreuve de fatigabilité et moment de force maximal des quadriceps lors de l'épreuve musculaire sur isocinétisme) et les capacités de marches, lors du test de marche de 2 minutes (2MWT) à l'issue de la rééducation. En d'autres termes, nous chercherons à montrer le caractère prédictif des capacités physiques à la phase pré-prothétique sur les capacités de marche à l'issue de la rééducation chez les sujets ayant subi une amputation majeure de membre inférieur.

D. Plan expérimental :

L'inclusion des patients, la recherche de critères d'exclusion ainsi que le recueil du consentement éclairé sera réalisé dans les 7 jours suivants leur admission dans le service de rééducation de l'appareil locomoteur, de l'hôpital P. Swynghedauw, au sein du CHRU de Lille.

Les évaluations aérobie, anaérobie et musculaire seront réalisées dans les six semaines suivant l'admission des patients dans leur unité.

E. Analyses statistiques

L'ensemble des analyses statistiques a pu être discuté en amont de l'étude avec l'Unité statistique, Evaluation Economique, Data-management (SEED) du CHRU de Lille.

Les analyses statistiques seront réalisées à l'aide du logiciel SAS (version 9.4 ou supérieure) et conduite à l'Unité Statistique, Évaluation Économique, Data-management (SEED) du CHU de Lille sous la responsabilité de Elodie Drumez. Tous les tests statistiques seront bilatéraux avec un risque de première espèce de 5%.

Les variables qualitatives seront décrites par les effectifs et pourcentages. Les variables quantitatives seront décrites par la moyenne et l'écart type en cas de distribution gaussienne, ou par la médiane et l'interquartile (i.e. 25^{ième} et 75^{ième} percentiles) dans le cas contraire. La normalité des distributions sera testée par un test de Shapiro-Wilk et vérifiée graphiquement par des histogrammes.

Concernant l'objectif principal, la fréquence de sujets ayant pu réaliser la totalité de l'évaluation de cette batterie sera estimée avec son intervalle de confiance à 95% (méthode exacte de Clopper-Pearson, intervalle asymétrique).

Concernant les objectifs secondaires 1, 2 et 3, les effets indésirables, les raisons de la non-complétion de la batterie de test, les capacités aérobies, anaérobies, musculaires lors de la phase pré-prothétique ainsi que les capacités de marche en fin de séjour de rééducation et 6 mois après la fin de la rééducation seront décrits par les statistiques usuelles.

Enfin, concernant l'objectif secondaire 4, les corrélations entre les capacités physiques évaluées en phase pré-prothétique sur les capacités de marche en fin de rééducation

seront évaluées à l'aide du test et du coefficient de corrélation de Pearson ou de Spearman selon la normalité des variables.

F. Nombre de participants

En l'absence d'études similaires retrouvées durant notre revue de littérature, et compte tenu du caractère exploratoire de notre étude, le calcul du nombre de sujet repose sur la capacité approximée de recrutement durant un temps d'inclusion de deux ans. Nous avons estimé à environ cinq patients recrutés par semestre, et prévoyons donc d'inclure un total de vingt patients.

V. DISCUSSION

A. Résultats attendus :

1. Protocole faisable

Au vu du peu de données issues de la littérature, mais en prenant soin d'appliquer les critères de non inclusion et d'exclusion, nous nous attendons à ce que cette batterie d'évaluation à l'effort soit faisable. S'agissant d'une étude pilote, il est difficile d'estimer a priori le taux de complétion de cette batterie d'évaluation à l'effort.

Durant la phase d'élaboration de notre protocole, une batterie d'évaluation des sujets amputés de membre inférieur à la phase pré-prothétique a été publiée par Ocampo-Plazas et al.¹⁰⁶ en Colombie. Leur batterie (EVAM1 pour EVAluation of the AMputee) comporte quatre groupes de paramètres : anthropométrie (poids, taille), évaluation musculaire des fléchisseurs et extenseurs du genou du côté amputé sur dynamomètre isocinétique, une évaluation aérobie sur ergomètre combiné membres supérieurs et membre inférieur, et une évaluation de l'extensibilité musculaire et mobilité articulaire. Cette batterie propose donc une évaluation plus globale, moins centrée sur les performances à l'effort de ces sujets amputés et les épreuves aérobie et musculaires diffèrent de celles que nous avons choisies. Les auteurs ont choisi une évaluation isocinétique du membre amputé, pour les sujets amputés en niveau sous-gonal. Nous pensons que les complications précoces locales, y compris les douleurs, gêneraient une grande partie des patients, raison pour laquelle notre choix s'est tourné vers l'évaluation du membre non amputé. Pour ce qui est de l'évaluation aérobie, l'ergocyclomètre comme l'ergomètre combiné se sont montrés réalisable chez les sujets amputés et nous ne pensons pas que ce choix modifiera la faisabilité de l'épreuve d'effort, mais l'interprétabilité des tracés électrocardiographiques et tensionnels devrait être meilleure sur ergocyclomètre. Les auteurs précisent

également que leur batterie d'évaluation doit encore être validée mais qu'il n'existe à ce jour pas de telle batterie permettant d'affirmer à coup sur leur faisabilité.

2. Concordance avec données de la littérature

Population :

Comme décrite en introduction⁵⁻⁷, la population de sujets amputés est une population âgée, en moyenne 65 ans, dont l'étiologie de l'amputation est majoritairement vasculaire (60 à 90% selon les études), et dont le niveau d'amputation est trans-tibial, trans-fémoral, plus rarement il s'agit de désarticulation de genou voire de hanche. Le design de notre étude amènera un effet centre, ce d'autant que l'étude se déroulera en centre hospitalo-universitaire, et de ce fait la population diffèrera probablement de la population habituellement décrite. Cependant, dans le cadre de notre étude de faisabilité, décrire une population plus âgée, polymorbide ou fragile que ne le voudraient les études descriptives usuelles, peut constituer une force en cas de résultats positifs.

Capacités aérobies

Comme décrit plus haut, peu d'études à ce jour se sont intéressées aux capacités aérobies des sujets amputés de membre inférieur avant la mise en place d'un appareillage. Ainsi, Chin et al.^{45,47}, en proposant l'évaluation à l'effort chez des sujets déjà appareillés et marchant avec leur appareillage, n'ont pu tenir compte de l'effet de l'entraînement à la marche ou à l'inverse du déconditionnement lié à la sédentarité. Néanmoins, si l'effet de la sédentarité est net en termes de capacités cardiorespiratoires maximales, il semble que la marche ne les modifie que peu chez le sujet sain⁴⁹. On peut questionner tout de même l'effet qu'a la marche de l'amputé, étant donné que son intensité relative est plus grande que chez les sujets sains,

comme décrit plus haut, du fait d'une demande métabolique augmentée et de capacités globalement plus faibles. De ce fait, les valeurs décrites en pourcentage de la VO₂max théorique (par Chin et al⁴⁵, chez des sujets âgés (72ans en moyenne) amputés de cause vasculaire au niveau trans-fémoral, pourraient être majorés chez les sujets marchants (en moyenne 58,6% +/-7,6% de VO₂max) et minorés chez les sujets non marchants ou marchant moins de 100m (en moyenne 42,3% +/-8,4% de VO₂max).

Les résultats décrits par Chin et al. lors d'une évaluation à la phase pré-prothétique⁴⁵, avec un VO₂max de 18,8mL/min/kg (+/-4,9), un seuil anaérobie de 12,8mL/min/kg (+/-2,0) et une puissance maximale développée de 67,6 watts (+/-20,2) pourraient être plus élevés que les capacités des patients de notre étude, car il s'agissait d'une population jeune (âge moyen 26+/-5,7ans) et l'amputation de cause traumatique.

Capacités anaérobies :

Il n'existe à ce jour et à notre connaissance pas de données décrites en termes d'évaluation anaérobie sur isocinétisme chez le sujet amputé de membre inférieur à la phase pré-prothétique. On peut s'appuyer sur les travaux de Moirenfeld et al.⁵⁷, réalisés chez des sujets amputés trans-tibiaux de cause traumatique, mais le délai après amputation (19,6ans en moyenne), le niveau, l'étiologie et l'âge (43,7ans en moyenne) de ces patients suggère des résultats supérieurs à ce que nous pourrions retrouver.

Capacités musculaires

Sur le plan musculaire, il est difficile d'anticiper les résultats attendus en termes de moment de force maximal à 120°/sec pour les extenseurs et fléchisseurs du genou. Slater et al.⁵⁸ ont retrouvé une valeur de 1,49Nm/kg (+/- 0,39) pour les extenseurs du

genou du membre non amputé (n=11), mais ces résultats ont été obtenus chez des sujets amputés transfémoraux marchant, à distance d'une amputation réalisée pour cause traumatique ou oncologique, avec un âge moyen de 46 ans (+/-12).

Moirenfeld et al.⁵⁷ ont décrit des valeurs similaires chez une population (n=11) de sujets amputés transtibiaux.

Muscle group	Sound limb		Amputated limb		p	Deficit
	Mean peak torque (SD)	Range	Mean peak Torque (SD)	Range		
Extensors	154.3 (45.0)	75.7-207.1	79.1 (40.3)	37.2-144.1	<.01	49.7 (20.4)
Flexors	74.6 (25.7)	28.9-119.2	49.3 (12.3)	32.1-66.3	<.01	35.1 (13.1)

Figure 12 Moment de force maximal des fléchisseurs et extenseurs du genou à 120°/sec (Moirenfeld et al.)

On note cependant les mêmes limites que dans l'étude de Slater et al., et les auteurs décrivaient les patients comme « d'excellents marcheurs ».

En 1996, dans une population comparable en termes d'âge, de délai depuis amputation de niveau et d'étiologie d'amputation, Ivakov et al. ont décrit des valeurs inférieures avec un moment de force maximal à 60°/sec, avec 76Nm (+/-31) pour les quadriceps du membre dit sain.

Ainsi, les capacités musculaires mais également anaérobies ont été décrites chez une population de sujets amputés en meilleur état général que la moyenne du fait d'un âge jeune, de l'absence d'étiologie vasculaire ainsi que du délai important depuis l'amputation. De ce fait, les valeurs déjà inférieures à celles de la population générale dans les études menées chez des sujets amputés que l'on peut qualifier de « performants » devraient être encore inférieure dans notre population de sujets amputés de niveau trans-tibial et au-dessus, toutes causes confondues, à la phase pré-prothétique.

Tests de marche en fin de rééducation

D'après la littérature, notamment Gaunard et al.⁹², la distance parcourue lors du test de marche de deux minutes (2MWT) par les sujets amputés de membre inférieurs est en moyenne de 143,8 (+/- 37,5) mètres. On note cependant qu'étant donnée la population relativement jeune, avec un âge moyen de 50ans, et ayant un niveau fonctionnel élevé (69% appartenant au niveau K3 et 24 au niveau K4), cette distance en fin de rééducation sera très certainement plus faible dans le cadre de notre étude. La distance sera probablement plus proche des 130 mètres retrouvés dans l'analyse des sous-groupes des amputations trans-fémorales (135,6m +/-30m) ou des amputations tous niveaux de cause vasculaire (130,6m +/- 34,7m).

On pourrait penser que l'entraînement à la marche régulière chez les sujets appareillés depuis plusieurs années confère de meilleures performances de marche et donc de meilleurs résultats au 2MWT – et ainsi les résultats dans le cadre de notre étude, en fin de séjour de rééducation, pourraient être inférieurs à ceux décrits dans la littérature. Peu d'études sont à notre connaissance disponible sur le sujet, et leurs résultats sont quelques peu discordants. En effet, **Wong et al.** n'ont pas montré que le délai depuis le premier appareillage influait significativement le 2MWT. Les auteurs restent prudents et discutent qu'il pourrait s'agir d'un manque de précision dans le délai, jusqu'à plusieurs dizaines d'années dans le cadre de leur étude rétrospective, avec un effet de l'entraînement régulier pouvant être présent dans les premiers mois voire années de marche avec prothèse avant de diminuer, pour n'être qu'un maintien des capacités physiques. Cependant, **Lin et al.** ont montré que l'activité physique journalière, quantifiée par le nombre de pas par jour, chez les sujets amputés de membre inférieur, d'étiologie dysvasculaire ou traumatique, et de niveau trans-tibial ou

trans-fémoral était corrélée positivement et significativement à la vitesse de marche spontanée et aux performances réalisées lors d'un test de marche de 6 minutes.

En outre, aux Etats-Unis, Abou et al.¹⁰⁷ ont montré dans une revue de littérature avec méta-analyse que le délai depuis l'amputation est significativement associé aux résultats des tests de marche, avec une relation en U inversé (figure 12). En effet, il existe une amélioration de la distance parcourue au test de marche de 6 minutes jusqu'à un certain délai, autour de 25-35ans, au-delà duquel les performances de marche commencent à décliner.

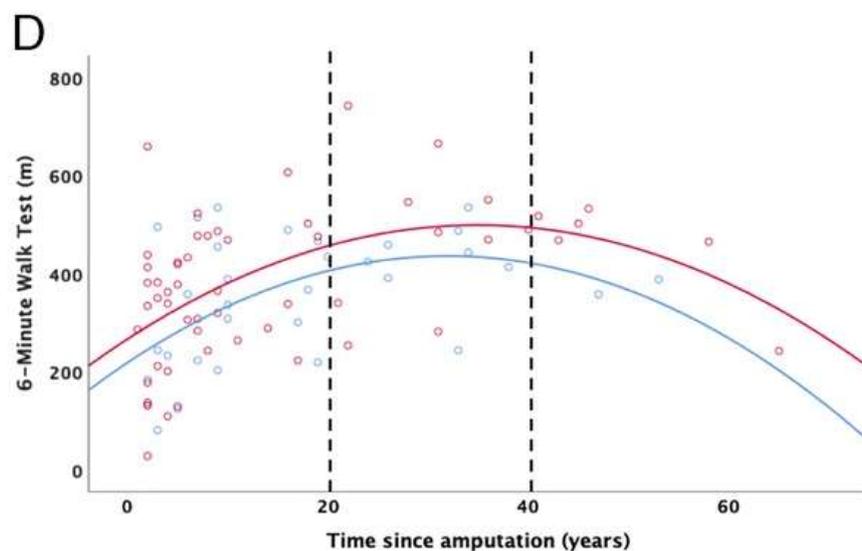


Figure 13 Performances au 6MWT en fonction du délai depuis l'amputation, Abou et al. 2017

Au total, qu'il s'agisse des capacités musculaires, anaérobies ou aérobies, du fait des conditions expérimentales, notamment du fait de la réalisation de l'évaluation durant la phase pré-prothétique, nous nous attendons à décrire des résultats inférieurs à ceux déjà présents dans la littérature chez des sujets ayant subi une amputation majeure de membre inférieur.

Les capacités aérobies, anaérobie et musculaires comme facteurs prédictifs des tests de marche à l'issue de la rééducation.

Etant donné le caractère préliminaire de cette étude, ainsi que le faible nombre de sujets à inclure (n=20), le quatrième objectif ne trouvera probablement pas de résultat significatif, mais si une tendance à la corrélation est retrouvée, elle ouvrirait de nouvelles perspectives en termes d'évaluation et de rééducation chez le sujet amputé de membre inférieur (cf infra). Le nombre de sujets nécessaire pour retrouver une corrélation significative pourrait alors être calculé pour une étude ultérieure à partir des résultats de notre étude pilote. Une étude rétrospective de Wong et al.²⁹ s'est intéressée notamment aux facteurs corrélés aux performances de marche lors du Test de 2 minutes (2MWT) en analyse de régression multivariée. On notait alors, outre des facteurs non modifiables décrits plus haut (sexe, âge), le niveau d'amputation sus-gonal, une étiologie vasculaire de l'amputation, également des scores d'équilibre (comme l'échelle de Berg et l'échelle ABC, Activites Balance Confidence scale) comme facteurs explicatifs des performances de marche. Pour les comorbidités cardiorespiratoires, non précisées, et les troubles trophiques au niveau du moignon, les auteurs ont montré une significativité en analyse univariée, mais pas en analyse multivariée. Ainsi, la marche et les performances de marche étant régies par un nombre important de facteurs, notre étude préliminaire, portant sur 20 sujets, ne répondra probablement pas à cet objectif secondaire, qui est en lui-même une ouverture pour de futures études.

3. Intérêt médical

L'épreuve d'effort est également une méthode non-invasive de dépistage de coronaropathie significative, d'ischémie myocardique à l'effort. Ceci apparait d'autant plus important que l'étiologie de l'amputation est vasculaire. En effet, une étude rapportait un risque d'évènement cardiaque majeur, critère composite comprenant décès de cause cardiaque, infarctus du myocarde ou nécessité d'une revascularisation

coronarienne, multiplié par quatre chez les sujets amputés au niveau trans-fémoral¹⁰⁸. En 2019, Ariel Berger et al.¹⁰⁹ ont estimé à 11% l'incidence d'évènement cardiaque majeur dans les deux ans suivant une amputation de membre inférieur pour cause vasculaire (artériopathie oblitérante des membres inférieurs).

De même, chez 725 les sujets atteints d'AOMI, une étude issue de la cohorte VETs par Leeper et al. en 2013¹¹⁰, comparant les sujets décédés au cours du suivi de 15 ans aux survivants, montrait que la capacité aérobie (<5METs versus >7METs) était un facteur prédictif important de mortalité. Ainsi, le risque relatif de mortalité toute cause confondue était de 0,7 ; 0,45 et 0,40 pour les patients ayant des capacités entre 4 et 6METs, entre 6 et 8METs et supérieures à 8 METs respectivement, comparativement à ceux ayant des capacités inférieures à 4 METs.

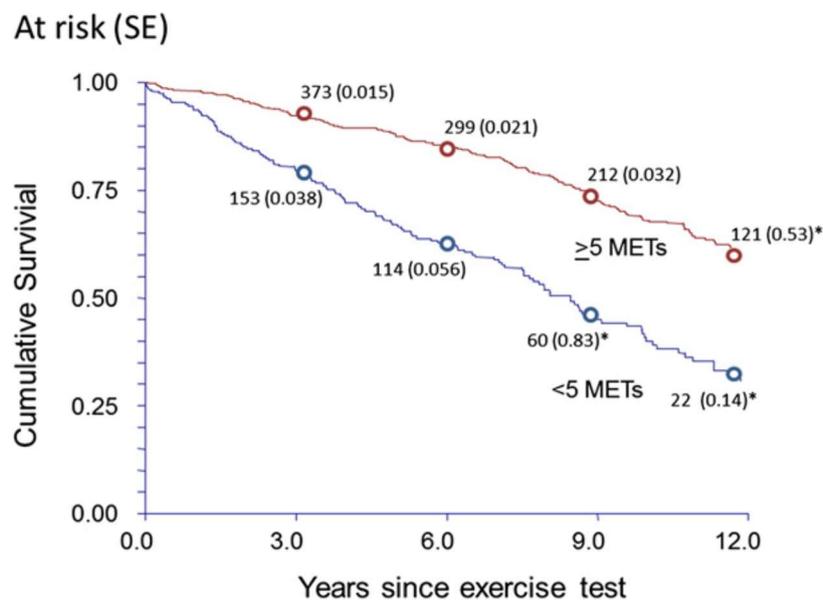


Figure 14 Courbe de survie de Kaplan Meier en fonction de la capacité fonctionnelle (<5METs, versus ≥5METs), Leeper et al.

Une étude menée à Calgary entre 1996 et 2016¹¹¹ dans un centre de rééducation cardiologique a montré que chez les sujets coronariens, quel que soit le statut artériel des membres inférieurs (AOMI versus pas d'AOMI), le bénéfice moyen était d'1 METs au terme de la rééducation et ce bénéfice était conservé jusqu'à 2 ans après la

rééducation. De plus, la survie était significativement améliorée par la rééducation cardiologique, indépendamment du statut vasculaire des membres inférieur, même si les sujets atteints d'une AOMI voyaient leur espérance de vie diminuée par rapport aux sujets indemnes d'AOMI.

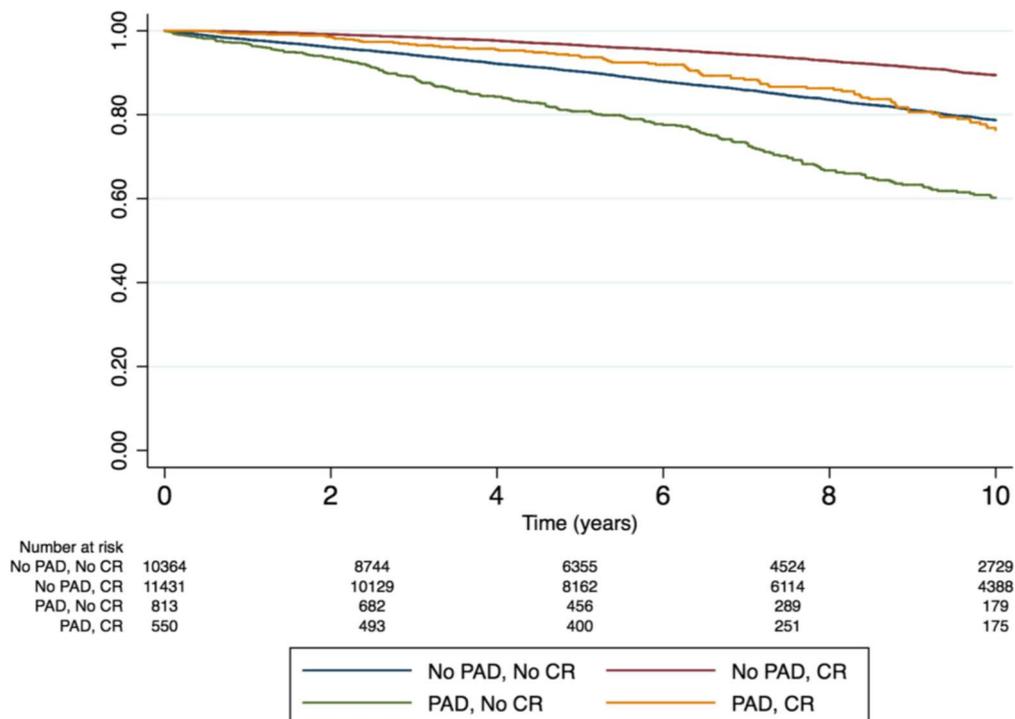


Figure 15 Survie selon le statut artériel des membres inférieur et la réalisation d'une rééducation cardiologique après revascularisation coronarienne, Devrome et al.

Ces deux études soulignent l'intérêt chez les sujets atteints d'artériopathie d'une rééducation à l'effort ainsi que l'impact des capacités aérobies sur la mortalité globale et cardiovasculaire dans cette population. Etant donnée la prévalence de l'AOMI dans la population de sujets amputés de membre inférieur, l'évaluation aérobie trouverait sa place afin non seulement d'évaluer le risque cardiovasculaire de ces sujets mais également afin de prévoir une rééducation adaptée à leurs capacités.

En effet, cette évaluation à l'effort permettrait d'établir un programme de réentraînement à l'effort personnalisé et au décours du séjour de rééducation, d'évaluer le gain en termes de capacités aérobies. Ceci est d'autant plus vrai qu'une

étude menée aux Pays Bas a montré qu'une rééducation traditionnelle pour prothésisation dans les suites d'une amputation n'améliorait pas les capacités aérobies en fin de séjour¹¹². De fait, la charge de travail cardiorespiratoire était inférieure à celle considérée comme requise pour le maintien des capacités cardiorespiratoires selon l'American College of Sport Medicine, soit plus de 30minutes par jour à une fréquence cardiaque supérieure à 40% de la fréquence cardiaque de réserve.

En allant plus loin, nous pourrions imaginer une classification du risque chez ces patients amputés, en partie basée sur l'évaluation à l'effort, à l'instar de celle proposée par la Société Française de Cardiologie chez les patients coronariens après la survenue d'un syndrome coronarien aigu, dont l'un des critères majeurs est la capacité aérobie, évaluée en METs (1 MET = 3,5mL/min/kg).

	Risque Faible	Risque Intermédiaire	Risque élevé
Capacité fonctionnelle (Pic VO ₂)	>7 METS > 20 mL/min/kg	5-7 METs 14-20mL/min/kg	>5 METs < 14mL/min/kg
Ischémie résiduelle	0	Sous ST < 2 mm à FC > 135bpm Angor d'effort stable	Sous ST > 2mm pour FC < 135bpm ou ischémie < 60 Watts Angor d'effort invalidant
FEVG	>50%	35-49%	<35%
Troubles du rythme	Pas d'arythmie complexe	Classe I et II de Lown au repos et à l'effort	Classe III et IV de Lown au repos et à l'effort
Evolution	Suites simples		Décompensation cardiaque Chute de PA ou faible élévation au test d'effort <10mmHg

Tableau 1 Classification du risque post-SCA selon la Société Française de Cardiologie

B. Difficultés attendues

1. Hétérogénéité des profils de patients

Du fait des paramètres d'inclusion, où nous avons pris le parti de ne pas limiter à un niveau d'amputation ni à une cause d'amputation, les profils de patients seront variés : d'un.e jeune patient.e amputé.e pour cause traumatique avec un passé de sportif au sujet âgé sédentaire, polymorbide avec facteurs de risque cardiovasculaires et ayant subi une amputation pour cause vasculaire. Ainsi, de nombreux autres facteurs que les capacités aérobies, anaérobie ou musculaire interviendront dans l'issue de la rééducation : motivation, complications médicales, équilibre, douleurs, etc qu'il faudra

prendre en compte notamment lors de l'analyse du quatrième objectif secondaire, à savoir la corrélation entre capacités physiques et paramètres de marche.

Cette hétérogénéité de la population d'intérêt constitue toutefois une force dans le cadre de l'objectif principal de l'étude, qui est de montrer que cette batterie d'évaluation à l'effort est faisable dans l'ensemble de la population des sujets ayant subi une amputation majeure de membre inférieur. Pour ce faire, il faudrait que cette population soit représentative en termes d'âge, de niveau et de cause d'amputation de la population des sujets amputés habituellement décrite. Du fait du design monocentrique de cette étude pilote, nous risquons cependant de faire face à un effet centre, mais il est possible que cela fasse inclure des patients dits « plus fragiles ».

2. Complications post-opératoires

Comme rapporté ci-dessus, la population d'intérêt pourra comporter notamment des sujets amputés pour cause vasculaire, dont on a déjà détaillé les fréquentes et nombreuses comorbidités : cardiopathie ischémique, BPCO, diabète et ses complications macro- et micro-angiopathique, etc. Ces pathologies chroniques présentent un risque de décompensation au décours d'un événement aigu et notamment une chirurgie, qui plus est une amputation, qui constitue une chirurgie lourde.

Une étude de cohorte rétrospective de Phair et al.¹¹³ à Boston en 2017 s'est intéressée au taux de réadmission après 739 amputations majeures de membre inférieur. Ce taux était de 28,8% dans les 30 jours suivant la chirurgie d'amputation et il était rapporté une mortalité de 8,8%. Parmi les 28,8% de réadmissions, la majorité (33,8%) était due à une infection d'un autre site que le moignon – premier rang desquels se trouvait l'infection pulmonaire – et venaient ensuite les complications au niveau du moignon (28,6%). Les auteurs notaient que ces taux de réadmission étaient plus élevés que

ceux décrits par Curran et al.¹¹⁴ basés sur les données de l'American College of Surgeons avec un taux de réadmission de 18% après amputation majeure de membre inférieur et un taux de complication localisée au moignon de 24%. Dans cette étude, les complications locales étaient la première cause de réadmission en chirurgie dans les 30 jours post-opératoires, comme l'illustre la figure suivante.

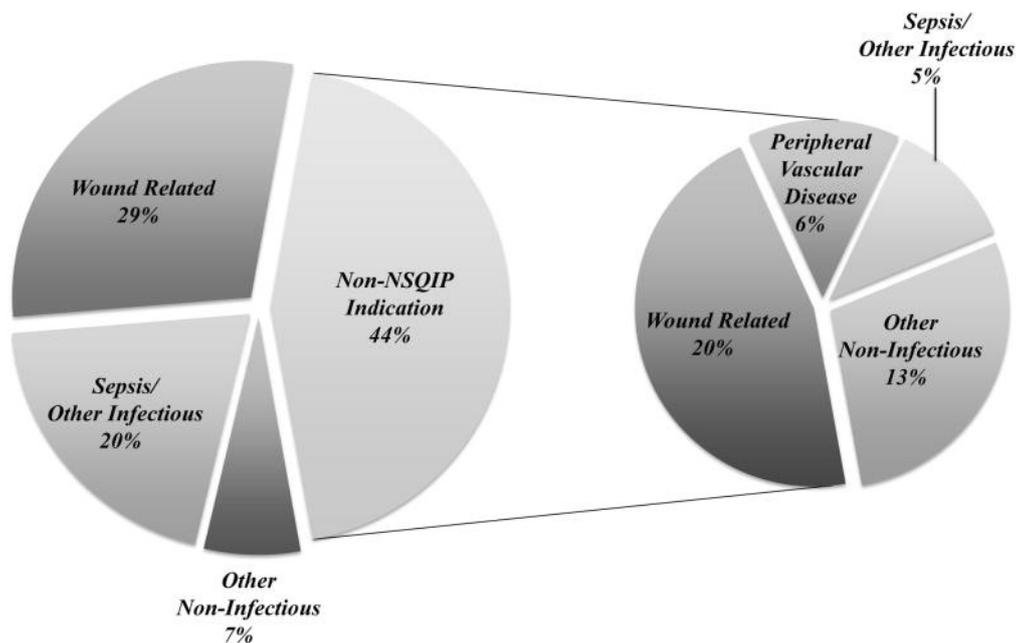


Figure 16 Causes de complications avec réadmission dans les 30 jours suivant une amputation majeure de membre inférieur, Curran et al.

Une étude plus récente, par Zambetti et al.¹¹⁵ de nouveau aux Etats-Unis, sur base des données de l'American College of Surgeons, a retrouvé, sur 14673 patients ayant subi une amputation majeure de membre inférieur entre 2012 et 2016, un taux de complication à 30 jours de 39,9%, dont 7,5% étaient des complications de plaie et 1,8% une réintervention pour amputation à un niveau plus proximal. En outre, un taux de mortalité de 6,3% était retrouvé.

Ainsi, la phase pré-prothétique, notamment durant le premier mois après l'amputation, est marquée par des complications locales ou générales graves qui peuvent nécessiter

pour près d'un tiers des patients une admission dans un service de soin aigu ou de chirurgie, ce qui pourra constituer un frein conséquent à la réalisation de la batterie d'évaluation à l'effort.

A côté des réadmissions en chirurgie, les soins de pansement, la gestion des douleurs et des complications hémorragiques ou infectieuses sont des problématiques fréquentes dans une unité prenant en charge des patients amputés de membre inférieur.

Concernant les douleurs, la plus décrite chez le sujet amputé est la douleur du membre fantôme, la deuxième étant la douleur du membre résiduel. Il est estimé que 95% des patients souffrent de l'une ou l'autre de ces douleurs au décours d'une amputation. Une revue de la littérature avec méta-analyse en 2020, menée par Limakatso et al.¹¹⁶, sur un total de 12738 patients amputés dont 10539 au niveau des membres inférieurs, a estimé la prévalence des douleurs du membre fantôme à 64% chez les sujets amputés. Cependant, en l'absence d'une définition claire, pouvant amener confondre douleurs du membre résiduel et douleurs du membre fantôme dans 27 études sur les 39 retenues pour méta-analyse, les auteurs pensent que cette prévalence est un peu surestimée. Néanmoins, on peut en retenir qu'au moins 2/3 des patients présentent des douleurs, ce qui pourra être un facteur limitant les évaluations à l'effort ou limitant les performances lors de ces tests.

Il est plus difficile d'estimer le taux de complications locales au niveau du moignon qui ne nécessitent pas de réadmissions en chirurgie, par exemple une lenteur à la cicatrisation ou une cicatrisation pathologique, et nous n'avons pas trouvé d'étude épidémiologique recensant ces complications.

3. Motivation

A la phase pré-prothétique, un des aspects importants de la prise en charge consiste en l'acceptation du handicap et la prise en charge psychologique. En effet, la perte de tout ou partie d'un membre est un évènement traumatisant, et ce quelle qu'en soit la cause : histoire oncologique avec traitements chimio- et radiothérapique, traumatique avec possibilité de syndrome de stress post-traumatique notamment lors des accidents de voie publique ou de travail (notre population étant peu concernée par les blessures de guerre), ou encore les causes vasculaires ou infectieuses avec une histoire douloureuse plus ou moins prolongée. La dépendance envers une tierce personne pour les actes élémentaires de la vie quotidienne, les douleurs, la perte initiale de la marche et donc de la liberté de déambulation, sont des facteurs déterminants en termes de qualité de vie, d'après une revue de littérature menée par Grzebien et al¹¹⁷.

Ainsi, dans un contexte de qualité de vie altérée et de difficultés psychologiques en lien direct ou indirect avec l'acte d'amputation, il pourra être difficile de faire accepter une évaluation plurimodale à l'effort maximal, ou du moins la réalisation d'un effort maximal pourra être rendue difficile par ce contexte. En effet, chez le sujet sain, la composante psychologique a un impact net sur les capacités maximales lors d'une épreuve d'effort. Il sera donc important de prendre en considération l'état psychologique des patients ainsi que leurs douleurs, via l'échelle HAD (Hospital Anxiety and Depression Scale) et l'EVA douleur par exemple.

C. Perspectives :

Cette évaluation globale et précoce des capacités physiques des sujets amputés permettrait de dépister et prévenir le déconditionnement cardiorespiratoire et musculaire, fréquent dans cette population spécifique.

Cette évaluation plurimodale, dans la batterie décrite ici, pourrait permettre une rééducation guidée par les déficiences de chacun, et un réentraînement à l'effort qui pourrait cibler en priorité les capacités les plus limitées (musculaires, anaérobies ou aérobies). Il a en effet été montré chez les sujets amputés, dans une revue de littérature avec méta-analyse, qu'un entraînement plus spécifique comprenant travail de l'équilibre, renforcement musculaire, travail de marche adapté aux capacités permettait une amélioration significativement plus grande qu'une rééducation dite « traditionnelle », le plus souvent basé exclusivement sur un travail de marche et autonomisation dans les activités de la vie quotidienne. On peut alors imaginer qu'un patient chez qui une limitation à l'effort aérobique plus marquée que lors de l'évaluation musculaire maximale ou anaérobie, pourrait bénéficier d'un protocole de réentraînement comprenant une part plus importante d'exercices aérobies sur ergocycle en unijambiste, basé sur les résultats de son évaluation, ou tout à l'opposé un patient avec déconditionnement musculaire prédominant pourrait obtenir de meilleurs gains en priorisant le renforcement musculaire analytique et global.

De même, il a été montré que la rééducation habituelle des sujets amputés de membre inférieur dans un centre spécialisé aux pays bas, ne permet pas tant sur le plan théorique que réel, une amélioration des capacités aérobies, car l'intensité d'exercice reste trop faible, avec moins de 30 minutes par jour passées à une fréquence cardiaque supérieure à 40% de la fréquence cardiaque de réserve¹¹². Pour rappel, la fréquence de cardiaque de réserve correspond à la différence entre la fréquence cardiaque maximale et la fréquence cardiaque de repos. Une évaluation objective des capacités physiques de cette population en début de séjour de rééducation pourrait alors permettre d'ajuster les séances de réentraînement cardiorespiratoire et de faire progresser les patients, plutôt que de maintenir leur condition physique.

Si une corrélation existe entre les capacités physiques évaluées en début de prise en charge rééducative pré-prothétique et les capacités de marche à l'issue de la rééducation, une évaluation plurimodale comme décrite dans notre étude pilote pourrait aider à préciser des objectifs en termes de déambulation voire même en termes d'appareillage au vu des critères de prise en charge financière par la Sécurité Sociale en France. Ainsi, par exemple, un sujet ayant réalisé une performance donnée lors de cette batterie d'évaluation à l'effort, pourrait connaître précocement des objectifs physiologiquement atteignables en termes de marche et d'appareillage, bien que ce dernier restera modulé par des problématiques locales comme l'état cicatriciel ou douloureux du moignon, régionales comme la présence ou non de limitations articulaires sus-jacentes ou encore générales comme des troubles de l'équilibre, de la coordination voire de motivation.

VI. CONCLUSION

Nous proposons donc un protocole d'évaluation multimodale à l'effort, c'est-à-dire aérobie sur ergocyclomètre, anaérobie et musculaire maximal sur dynamomètre d'isocinétisme, dans une population de sujets ayant subi une amputation majeure de membre inférieur et se trouvant à la phase pré-prothétique. Nous pensons que ce protocole est faisable, au vu des données présentes dans la littérature et les perspectives en termes de diagnostic, de pronostic à la fois médical, rééducatif et de réadaptation sont grandes. En effet, il s'agit de sujets dont le déconditionnement cardiorespiratoire et musculaire a été prouvé à distance de l'amputation, mais dont l'évaluation précoce manque encore de preuve et de standardisation. Cette étude de faisabilité ouvre donc un vaste champ de possibilités d'études futures.

1. Monroe, L. G., Cameron, M. H. et Monroe, L. *Physical Rehabilitation Evidence-Based Examination, Evaluation, and Intervention*. Saunders/Elsevier.; 2007.
2. GIRL. *Book de L'interne*.; 2020.
3. 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(4):391-396. doi:10.1111/j.1464-5491.2009.02698.x
4. Ziegler-Graham K, MacKenzie EJ, Ephraim PL, Travison TG, Brookmeyer R. Estimating the prevalence of limb loss in the United States: 2005 to 2050. *Arch Phys Med Rehabil*. 2008;89(3):422-429. doi:10.1016/j.apmr.2007.11.005
5. 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. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*. 2020;60(1):88-96. doi:10.1016/j.ejvs.2020.03.018
6. Marcos García L, Mateos Torres E, Velescu A, Díaz Duran C, Lacambra Peñart M, Clará Velasco A. Natural History After Below-knee Amputation: Analysis of Survival and Prosthetic Fitting Over 2 Decades. *Cir Esp (Engl Ed)*. 2020;98(7):403-408. doi:10.1016/j.ciresp.2019.11.007
7. Incidence de l'amputation majeure des membres inférieurs à Genève : vingt-et-un ans d'observation. *Revue Medicale Suisse*. Accessed June 28, 2021. <https://www.revmed.ch/revue-medicale-suisse/2014/revue-medicale-suisse-447/incidence-de-l-amputation-majeure-des-membres-inferieurs-a-geneve-vingt-et-un-ans-d-observation>
8. Whittaker JD, Tullett R, Patel N, Newman J, Garnham A, Wall M. Short-term Mortality, Morbidity and Recovery Milestones after Major Lower Limb Amputation: a Prospective Evaluation of Outcomes in a Tertiary Center. *Ann Vasc Surg*. 2019;56:261-273. doi:10.1016/j.avsg.2018.07.070
9. Meshkin DH, Zolper EG, Chang K, et al. Long-term Mortality After Nontraumatic Major Lower Extremity Amputation: A Systematic Review and Meta-analysis. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*. 2021;60(3):567-576. doi:10.1053/j.jfas.2020.06.027
10. Kamrad I, Söderberg B, Örneholm H, Hagberg K. SwedeAmp-the Swedish Amputation and Prosthetics Registry: 8-year data on 5762 patients with lower limb amputation show sex differences in

amputation level and in patient-reported outcome. *Acta Orthop.* 2020;91(4):464-470. doi:10.1080/17453674.2020.1756101

11. 2019 ESC guidelines on dyslipidaemias: which LDL target for your patients? Accessed August 13, 2022. <https://www.escardio.org/Education/E-Learning/Webinars/2019-esc-guidelines-on-dyslipidemias-which-ldl-target-for-your-patients>, <https://www.escardio.org/Education/E-Learning/Webinars/2019-esc-guidelines-on-dyslipidemias-which-ldl-target-for-your-patients>
12. Kurichi JE, Kwong PL, Reker DM, Bates BE, Marshall CR, Stineman MG. Clinical factors associated with prescription of a prosthetic limb in elderly veterans. *J Am Geriatr Soc.* 2007;55(6):900-906. doi:10.1111/j.1532-5415.2007.01187.x
13. Lansade C, Chiesa G, Paysant J, Vicaut E, Cristina MC, Ménager D. Impact of C-LEG on mobility, satisfaction and quality of life in a multicenter cohort of femoral amputees. *Ann Phys Rehabil Med.* 2021;64(1):101386. doi:10.1016/j.rehab.2020.03.011
14. Spaan MH, Vrieling AH, van de Berg P, Dijkstra PU, van Keeken HG. Predicting mobility outcome in lower limb amputees with motor ability tests used in early rehabilitation. *Prosthet Orthot Int.* 2017;41(2):171-177. doi:10.1177/0309364616670397
15. Chin T, Sawamura S, Shiba R. Effect of physical fitness on prosthetic ambulation in elderly amputees. *Am J Phys Med Rehabil.* 2006;85(12):992-996. doi:10.1097/01.phm.0000247653.11780.0b
16. Fajardo-Martos I, Roda O, Zambudio-Periago R, Bueno-Cavanillas A, Hita-Contreras F, Sánchez-Montesinos I. Predicting successful prosthetic rehabilitation in major lower-limb amputation patients: a 15-year retrospective cohort study. *Braz J Phys Ther.* 2018;22(3):205-214. doi:10.1016/j.bjpt.2017.08.002
17. Darter BJ, Hawley CE, Armstrong AJ, Avellone L, Wehman P. Factors Influencing Functional Outcomes and Return-to-Work After Amputation: A Review of the Literature. *J Occup Rehabil.* 2018;28(4):656-665. doi:10.1007/s10926-018-9757-y
18. Norvell DC, Turner AP, Williams RM, Hakimi KN, Czerniecki JM. Defining successful mobility after lower extremity amputation for complications of peripheral vascular disease and diabetes. *Journal of Vascular Surgery.* 2011;54(2):412-419. doi:10.1016/j.jvs.2011.01.046

19. MacCallum KP, Yau P, Phair J, Lipsitz EC, Scher LA, Garg K. Ambulatory Status following Major Lower Extremity Amputation. *Annals of Vascular Surgery*. 2021;71:331-337. doi:10.1016/j.avsg.2020.07.038
20. Wurdeman SR, Stevens PM, Campbell JH. Mobility Analysis of Amputees (MAAT I): Quality of life and satisfaction are strongly related to mobility for patients with a lower limb prosthesis. *Prosthet Orthot Int*. 2018;42(5):498-503. doi:10.1177/0309364617736089
21. 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(6):537-547. doi:10.1177/0309364617690394
22. Damiani C, Pournajaf S, Goffredo M, et al. Community ambulation in people with lower limb amputation: An observational cohort study. *Medicine (Baltimore)*. 2021;100(3):e24364. doi:10.1097/MD.00000000000024364
23. Sinha R, van den Heuvel WJA, Arokiasamy P. Factors affecting quality of life in lower limb amputees. *Prosthet Orthot Int*. 2011;35(1):90-96. doi:10.1177/0309364610397087
24. Preece RA, Dilaver N, Waldron CA, et al. A Systematic Review and Narrative Synthesis of Risk Prediction Tools Used to Estimate Mortality, Morbidity, and Other Outcomes Following Major Lower Limb Amputation. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*. Published online April 24, 2021. doi:10.1016/j.ejvs.2021.02.038
25. Bowrey S, Naylor H, Russell P, Thompson J. Development of a scoring tool (BLARt score) to predict functional outcome in lower limb amputees. *Disability and Rehabilitation*. 2019;41(19):2324-2332. doi:10.1080/09638288.2018.1466201
26. Hamamura S, Chin T, Kuroda R, et al. Factors affecting prosthetic rehabilitation outcomes in amputees of age 60 years and over. *J Int Med Res*. 2009;37(6):1921-1927. doi:10.1177/147323000903700630
27. Sansam K, Neumann V, O'Connor R, Bhakta B. Predicting walking ability following lower limb amputation: a systematic review of the literature. *J Rehabil Med*. 2009;41(8):593-603. doi:10.2340/16501977-0393

28. Kahle JT, Highsmith MJ, Schaepper H, Johannesson A, Orendurff MS, Kaufman K. PREDICTING WALKING ABILITY FOLLOWING LOWER LIMB AMPUTATION: AN UPDATED SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW. *Technol Innov.* 2016;18(2-3):125-137. doi:10.21300/18.2-3.2016.125
29. Wong CK, Chihuri ST, Santo EG, White RA. Relevance of medical comorbidities for functional mobility in people with limb loss: retrospective explanatory models for a clinical walking measure and a patient-reported functional outcome. *Physiotherapy.* 2020;107:133-141. doi:10.1016/j.physio.2020.01.002
30. Cohen-Solal A, Carré F. *Guide Pratique Des Épreuves d'effort Cardiorespiratoires*. Elsevier Masson. ELSEVIER; 2009.
31. Cruts HE, de Vries J, Zilvold G, Huisman K, van Alsté JA, Boom HB. Lower extremity amputees with peripheral vascular disease: graded exercise testing and results of prosthetic training. *Arch Phys Med Rehabil.* 1987;68(1):14-19.
32. Klenow TD, Mengelkoch LJ, Stevens PM, et al. The role of exercise testing in predicting successful ambulation with a lower extremity prosthesis: a systematic literature review and clinical practice guideline. *J NeuroEngineering Rehabil.* 2018;15(S1):64. doi:10.1186/s12984-018-0401-z
33. Houdijk H, Blokland IJ, Nazier SA, Castenmiller SV, van den Heuvel I, Ijmker T. Effects of Handrail and Cane Support on Energy Cost of Walking in People With Different Levels and Causes of Lower Limb Amputation. *Arch Phys Med Rehabil.* 2021;102(7):1340-1346.e3. doi:10.1016/j.apmr.2021.02.007
34. Montgomery JR, Grabowski AM. Use of a powered ankle-foot prosthesis reduces the metabolic cost of uphill walking and improves leg work symmetry in people with transtibial amputations. *Journal of The Royal Society Interface.* 2018;15(145):20180442. doi:10.1098/rsif.2018.0442
35. Mohanty RK, Lenka P, Equebal A, Kumar R. Comparison of energy cost in transtibial amputees using "prosthesis" and "crutches without prosthesis" for walking activities. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine.* 2012;55(4):252-262. doi:10.1016/j.rehab.2012.02.006

36. Trallesi M, Porcaccia P, Aversa T, Brunelli S. Energy cost of walking measurements in subjects with lower limb amputations: A comparison study between floor and treadmill test. *Gait & Posture*. 2008;27(1):70-75. doi:10.1016/j.gaitpost.2007.01.006
37. Russell Esposito E, Rábago CA, Wilken J. The influence of traumatic transfemoral amputation on metabolic cost across walking speeds. *Prosthet Orthot Int*. 2018;42(2):214-222. doi:10.1177/0309364617708649
38. van Schaik L, Geertzen JHB, Dijkstra PU, Dekker R. Metabolic costs of activities of daily living in persons with a lower limb amputation: A systematic review and meta-analysis. Grabowski A, ed. *PLoS ONE*. 2019;14(3):e0213256. doi:10.1371/journal.pone.0213256
39. Wezenberg D, van der Woude LH, Faber WX, de Haan A, Houdijk H. Relation between aerobic capacity and walking ability in older adults with a lower-limb amputation. *Arch Phys Med Rehabil*. 2013;94(9):1714-1720. doi:10.1016/j.apmr.2013.02.016
40. Chin T, Sawamura S, Fujita H, et al. The efficacy of physiological cost index (PCI) measurement of a subject walking with an Intelligent Prosthesis. *Prosthet Orthot Int*. 1999;23(1):45-49. doi:10.3109/03093649909071609
41. Hagberg K, Häggström E, Brånemark R. Physiological cost index (PCI) and walking performance in individuals with transfemoral prostheses compared to healthy controls. *Disabil Rehabil*. 2007;29(8):643-649. doi:10.1080/09638280600902869
42. Vllasolli TO, Zafirova B, Orovcane N, Poposka A, Murtezani A, Krasniqi B. Energy expenditure and walking speed in lower limb amputees: a cross sectional study. *Ortop Traumatol Rehabil*. 2014;16(4):419-426. doi:10.5604/15093492.1119619
43. Ettema S, Kal E, Houdijk H. General estimates of the energy cost of walking in people with different levels and causes of lower-limb amputation: a systematic review and meta-analysis. *Prosthet Orthot Int*. 2021;45(5):417-427. doi:10.1097/PXR.0000000000000035
44. Jayaraman C, Mummisetty CK, Albert MV, et al. Using a microprocessor knee (C-Leg) with appropriate foot transitioned individuals with dysvascular transfemoral amputations to higher performance levels: a longitudinal randomized clinical trial. *J Neuroeng Rehabil*. 2021;18(1):88. doi:10.1186/s12984-021-00879-3

45. Chin T, Sawamura S, Fujita H, et al. Physical Fitness of Lower Limb Amputees. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*. 2002;81(5):321-325.
46. Wezenberg D, de Haan A, Faber WX, Slootman HJ, van der Woude LH, Houdijk H. Peak oxygen consumption in older adults with a lower limb amputation. *Arch Phys Med Rehabil*. 2012;93(11):1924-1929. doi:10.1016/j.apmr.2012.05.020
47. Chin T, Sawamura S, Fujita H, et al. The efficacy of the one-leg cycling test for determining the anaerobic threshold (AT) of lower limb amputees. *Prosthet Orthot Int*. 1997;21(2):141-146. doi:10.3109/03093649709164542
48. Gjovaag T, Mirtaheeri P, Starholm IM. Carbohydrate and fat oxidation in persons with lower limb amputation during walking with different speeds. *Prosthet Orthot Int*. 2018;42(3):304-310. doi:10.1177/0309364617740237
49. Zhang JG, Ohta T, Ishikawa-Takata K, Tabata I, Miyashita M. Effects of daily activity recorded by pedometer on peak oxygen consumption (VO₂peak), ventilatory threshold and leg extension power in 30- to 69-year-old Japanese without exercise habit. *Eur J Appl Physiol*. 2003;90(1-2):109-113. doi:10.1007/s00421-003-0860-0
50. Fiser WM, Hays NP, Rogers SC, et al. Energetics of Walking in Elderly People: Factors Related to Gait Speed. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*. 2010;65A(12):1332-1337. doi:10.1093/gerona/gdq137
51. Outermans J, van de Port I, Wittink H, de Groot J, Kwakkel G. How strongly is aerobic capacity correlated with walking speed and distance after stroke? Systematic review and meta-analysis. *Phys Ther*. 2015;95(6):835-853. doi:10.2522/ptj.20140081
52. Mandic S, Walker R, Stevens E, et al. Estimating exercise capacity from walking tests in elderly individuals with stable coronary artery disease. *Disability and Rehabilitation*. 2013;35(22):1853-1858. doi:10.3109/09638288.2012.759629
53. Ross RM, Murthy JN, Wollak ID, Jackson AS. The six minute walk test accurately estimates mean peak oxygen uptake. *BMC Pulm Med*. 2010;10:31. doi:10.1186/1471-2466-10-31

54. Orendurff MS, Schoen JA, Bernatz GC, Segal AD, Klute GK. How humans walk: bout duration, steps per bout, and rest duration. *J Rehabil Res Dev.* 2008;45(7):1077-1089. doi:10.1682/jrrd.2007.11.0197
55. Krops LA, Albada T, van der Woude LHV, Hijmans JM, Dekker R. Anaerobic exercise testing in rehabilitation: A systematic review of available tests and protocols. *J Rehabil Med.* 2017;49(4):289-303. doi:10.2340/16501977-2213
56. Hewson A, Dent S, Sawers A. Strength deficits in lower limb prosthesis users: A scoping review. *Prosthet Orthot Int.* 2020;44(5):323-340. doi:10.1177/0309364620930176
57. Moirenfeld I, Ayalon M, BenSira D, Isakov E. Isokinetic strength and endurance of the knee extensors and flexors in transtibial amputees. *Prosthetics & Orthotics International.* 2000;24(3):221-225. doi:10.1080/03093640008726551
58. Slater L, Finucane S, Hargrove LJ. Knee extensor power predicts six-minute walk test performance in people with transfemoral amputations. *PM R.* Published online April 18, 2021. doi:10.1002/pmrj.12606
59. Miller RH, Russell Esposito E. Transtibial limb loss does not increase metabolic cost in three-dimensional computer simulations of human walking. *PeerJ.* 2021;9:e11960. doi:10.7717/peerj.11960
60. Hijmans JM, Dekker R, Geertzen JHB. Pre-operative rehabilitation in lower-limb amputation patients and its effect on post-operative outcomes. *Med Hypotheses.* 2020;143:110134. doi:10.1016/j.mehy.2020.110134
61. Chin T, Sawamura S, Fujita H, et al. %VO₂max as an indicator of prosthetic rehabilitation outcome after dysvascular amputation. *Prosthet Orthot Int.* 2002;26(1):44-49. doi:10.1080/03093640208726620
62. Cardiocirculatory and metabolic strain during rowing ergometry in coronary patients - Urhausen - 1994 - Clinical Cardiology - Wiley Online Library. Accessed November 30, 2020. <https://onlinelibrary-wiley-com.ressources-electroniques.univ-lille.fr/doi/abs/10.1002/clc.4960171205?sid=nlm%3Apubmed>

63. Bini RR, Jacques TC, Lanferdini FJ, Vaz MA. Comparison of kinetics, kinematics, and electromyography during single-leg assisted and unassisted cycling. *J Strength Cond Res.* 2015;29(6):1534-1541. doi:10.1519/JSC.0000000000000905
64. Watanabe K, Yamaguchi Y, Fukuda W, Nakazawa S, Kenjo T, Nishiyama T. Neuromuscular activation pattern of lower extremity muscles during pedaling in cyclists with single amputation of leg and with two legs: a case study. *BMC Res Notes.* 2020;13(1):299. doi:10.1186/s13104-020-05144-9
65. ATS/ACCP Statement on Cardiopulmonary Exercise Testing. *Am J Respir Crit Care Med.* 2003;167(2):211-277. doi:10.1164/rccm.167.2.211
66. Wezenberg D, de Haan A, van der Woude LH, Houdijk H. Feasibility and validity of a graded one-legged cycle exercise test to determine peak aerobic capacity in older people with a lower-limb amputation. *Phys Ther.* 2012;92(2):329-338. doi:10.2522/ptj.20110125
67. Preisser AM, Velasco Garrido M, Bittner C, Hampel E, Harth V. Gradual versus continuous increase of load in ergometric tests: are the results comparable? *Adv Exp Med Biol.* 2015;840:51-58. doi:10.1007/5584_2014_15
68. Bowen TS, Cannon DT, Begg G, Baliga V, Witte KK, Rossiter HB. A novel cardiopulmonary exercise test protocol and criterion to determine maximal oxygen uptake in chronic heart failure. *J Appl Physiol (1985).* 2012;113(3):451-458. doi:10.1152/jappphysiol.01416.2011
69. Edouard P, Degache F. *Guide d'isocinétisme : L'évaluation Isocinétique Des Concepts Aux Conditions Sportives et Pathologiques.* Elsevier Masson.
70. Isakov E, Burger H, Gregorič M, Marinček C. Isokinetic and isometric strength of the thigh muscles in below-knee amputees. *Clinical Biomechanics.* 1996;11(4):233-235. doi:10.1016/0268-0033(95)00078-X
71. Beneke R, Pollmann C, Bleif I, Leithäuser R, Hütler M. How anaerobic is the Wingate Anaerobic Test for humans? *Eur J Appl Physiol.* 2002;87(4):388-392. doi:10.1007/s00421-002-0622-4
72. Takken T, van der Net J, Helders PJM. Relationship between functional ability and physical fitness in juvenile idiopathic arthritis patients. *Scand J Rheumatol.* 2003;32(3):174-178. doi:10.1080/03009740310002524

73. Carey DG, Richardson MT. Can Aerobic and Anaerobic Power be Measured in a 60-Second Maximal Test? *J Sports Sci Med*. 2003;2(4):151-157.
74. Nedeljkovic A, Mirkov DM, Pazin N, Jaric S. Evaluation of Margaria staircase test: the effect of body size. *Eur J Appl Physiol*. 2007;100(1):115-120. doi:10.1007/s00421-007-0401-3
75. Laroche D, Mangin M, Besson D, Naaim A, Gouteron A, Casillas JM. Number of raised steps: A tool to assess brief and intense effort involving anaerobic metabolism. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2018;61(3):156-163. doi:10.1016/j.rehab.2017.12.009
76. Besson D, Gouteron A, Sinssaine-Ayillo A, et al. Is the Short and Fast Step Test a safe and feasible tool for exploring anaerobic capacities of individuals with coronary heart disease in clinical practice? *Eur J Phys Rehabil Med*. 2021;57(6):977-984. doi:10.23736/S1973-9087.21.06713-7
77. Ribeiro F, Lépine PA, Garceau-Bolduc C, et al. Test-retest reliability of lower limb isokinetic endurance in COPD: A comparison of angular velocities. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis*. 2015;10:1163-1172. doi:10.2147/COPD.S81806
78. Bosquet L, Gouadec K, Berryman N, Duclos C, Gremeaux V, Croisier JL. The Total Work Measured During a High Intensity Isokinetic Fatigue Test Is Associated With Anaerobic Work Capacity. *J Sports Sci Med*. 2016;15(1):126-130.
79. Saenz A, Avellanet M, Hijos E, et al. Knee isokinetic test-retest: a multicentre knee isokinetic test-retest study of a fatigue protocol. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2010;46(1):81-88.
80. Paulus J. Indicators in isokinetic fatigability protocol: What to preserve? *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. Published online 2015. doi:10.1016/j.rehab.2015.07.383
81. McGavin CR, Gupta SP, McHardy GJ. Twelve-minute walking test for assessing disability in chronic bronchitis. *Br Med J*. 1976;1(6013):822-823.
82. Butland RJ, Pang J, Gross ER, Woodcock AA, Geddes DM. Two-, six-, and 12-minute walking tests in respiratory disease. *BMJ*. 1982;284(6329):1607-1608. doi:10.1136/bmj.284.6329.1607
83. Lin SJ, Bose NH. Six-minute walk test in persons with transtibial amputation. *Arch Phys Med Rehabil*. 2008;89(12):2354-2359. doi:10.1016/j.apmr.2008.05.021

84. Linberg AA, Roach KE, Campbell SM, et al. Comparison of 6-minute walk test performance between male Active Duty soldiers and servicemembers with and without traumatic lower-limb loss. *J Rehabil Res Dev*. 2013;50(7):931-940. doi:10.1682/JRRD.2012.05.0098
85. Mossberg KA, Fortini E. Responsiveness and validity of the six-minute walk test in individuals with traumatic brain injury. *Phys Ther*. 2012;92(5):726-733. doi:10.2522/ptj.20110157
86. Andersen LK, Knak KL, Witting N, Vissing J. Two- and 6-minute walk tests assess walking capability equally in neuromuscular diseases. *Neurology*. 2016;86(5):442-445. doi:10.1212/WNL.0000000000002332
87. Gloeckl R, Teschler S, Jarosch I, Christle JW, Hitzl W, Kenn K. Comparison of two- and six-minute walk tests in detecting oxygen desaturation in patients with severe chronic obstructive pulmonary disease — A randomized crossover trial. *Chron Respir Dis*. 2016;13(3):256-263. doi:10.1177/1479972316636991
88. Gijbels D, Eijnde B, Feys P. Comparison of the 2- and 6-minute walk test in multiple sclerosis. *Mult Scler*. 2011;17(10):1269-1272. doi:10.1177/1352458511408475
89. Brooks D, Hunter JP, Parsons J, Livsey E, Quirt J, Devlin M. Reliability of the two-minute walk test in individuals with transtibial amputation. *Arch Phys Med Rehabil*. 2002;83(11):1562-1565. doi:10.1053/apmr.2002.34600
90. Gremeaux V, Damak S, Troisgros O, 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(4):415-422. doi:10.1177/0309364612437904
91. Pin TW. Psychometric properties of 2-minute walk test: a systematic review. *Arch Phys Med Rehabil*. 2014;95(9):1759-1775. doi:10.1016/j.apmr.2014.03.034
92. Gaunard I, Kristal A, Horn 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(7):1183-1189. doi:10.1016/j.apmr.2020.03.007

93. Parker K, Kirby RL, Adderson J, Thompson K. Ambulation of People With Lower-Limb Amputations: Relationship Between Capacity and Performance Measures. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2010;91(4):543-549. doi:10.1016/j.apmr.2009.12.009
94. Chan WLS, Pin TW. Reliability, validity and minimal detectable change of 2-min walk test and 10-m walk test in frail older adults receiving day care and residential care. *Aging Clin Exp Res*. Published online June 26, 2019. doi:10.1007/s40520-019-01255-x
95. Batten HR, McPhail SM, Mandrusiak AM, Varghese PN, Kuys SS. Gait speed as an indicator of prosthetic walking potential following lower limb amputation. *Prosthet Orthot Int*. 2019;43(2):196-203. doi:10.1177/0309364618792723
96. Lansade C, Vicaut E, Paysant J, et al. Mobility and satisfaction with a microprocessor-controlled knee in moderately active amputees: A multi-centric randomized crossover trial. *Ann Phys Rehabil Med*. 2018;61(5):278-285. doi:10.1016/j.rehab.2018.04.003
97. Jousain C, Laroche D, Casillas JM, et al. Transcultural validation of the SIGAM mobility grades in French: The SIGAM-Fr. *Ann Phys Rehabil Med*. 2015;58(3):161-166. doi:10.1016/j.rehab.2015.02.003
98. 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(18):1455-1473. doi:10.1080/09638280802639491
99. Miller WC, Deathe AB, Speechley M. Lower extremity prosthetic mobility: A comparison of 3 self-report scales. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2001;82(10):1432-1440. doi:10.1053/apmr.2001.25987
100. Wong CK, Gibbs W, Chen ES. Use of the Houghton Scale to Classify Community and Household Walking Ability in People With Lower-Limb Amputation: Criterion-Related Validity. *Arch Phys Med Rehabil*. 2016;97(7):1130-1136. doi:10.1016/j.apmr.2016.01.022
101. Devlin M, Pauley T, Head K, Garfinkel S. Houghton Scale of prosthetic use in people with lower-extremity amputations: Reliability, validity, and responsiveness to change. *Arch Phys Med Rehabil*. 2004;85(8):1339-1344. doi:10.1016/j.apmr.2003.09.025

102. Gauthier-Gagnon C, Gris  MC. Prosthetic profile of the amputee questionnaire: validity and reliability. *Arch Phys Med Rehabil*. 1994;75(12):1309-1314.
103. Franchignoni F, Orlandini D, Ferriero G, Moscato TA. Reliability, validity, and responsiveness of the locomotor capabilities index in adults with lower-limb amputation undergoing prosthetic training. *Arch Phys Med Rehabil*. 2004;85(5):743-748. doi:10.1016/j.apmr.2003.06.010
104. Franchignoni F, Trallesi M, Monticone M, Giordano A, Brunelli S, Ferriero G. Sensitivity to change and minimal clinically important difference of the Locomotor Capabilities Index-5 in people with lower limb amputation undergoing prosthetic training. *Ann Phys Rehabil Med*. 2019;62(3):137-141. doi:10.1016/j.rehab.2019.02.004
105. Hansen JE, Sue DY, Wasserman K. Predicted values for clinical exercise testing. *Am Rev Respir Dis*. 1984;129(2 Pt 2):S49-55. doi:10.1164/arrd.1984.129.2P2.S49
106. Ocampo-Plazas ML, Prieto-Mondrag n L del P, Solorzano MA, Escobar FC. Fitness for health assessment in unilateral lower limb amputation: The Evam1 battery. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*. 2020;33(4):569-579. doi:10.3233/BMR-181441
107. Abou L, Fliflet A, Zhao L, Du Y, Rice L. The Effectiveness of Exercise Interventions to Improve Gait and Balance in Individuals with Lower Limb Amputations: A Systematic Review and Meta-analysis. *Clin Rehabil*. Published online March 7, 2022:2692155221086204. doi:10.1177/02692155221086204
108. Mundell BF, Luetmer MT, Kremers HM, Visscher S, Hoppe KM, Kaufman KR. The risk of major cardiovascular events for adults with transfemoral amputation. *J Neuroeng Rehabil*. 2018;15(Suppl 1):58. doi:10.1186/s12984-018-0400-0
109. Berger A, Simpson A, Bhagnani T, et al. Incidence and Cost of Major Adverse Cardiovascular Events and Major Adverse Limb Events in Patients With Chronic Coronary Artery Disease or Peripheral Artery Disease. *The American Journal of Cardiology*. 2019;123(12):1893-1899. doi:10.1016/j.amjcard.2019.03.022
110. Leeper NJ, Myers J, Zhou M, et al. Exercise capacity is the strongest predictor of mortality in patients with peripheral arterial disease. *J Vasc Surg*. 2013;57(3):728-733. doi:10.1016/j.jvs.2012.07.051

111. Devrome AN, Aggarwal S, McMurtry MS, et al. Cardiac rehabilitation in people with peripheral arterial disease: A higher risk population that benefits from completion. *International Journal of Cardiology*. 2019;285:108-114. doi:10.1016/j.ijcard.2019.02.070
112. Wezenberg D, Dekker R, van Dijk F, Faber W, van der Woude L, Houdijk H. Cardiorespiratory fitness and physical strain during prosthetic rehabilitation after lower limb amputation. *Prosthet Orthot Int*. 2019;43(4):418-425. doi:10.1177/0309364619838084
113. Phair J, DeCarlo C, Scher L, et al. Risk factors for unplanned readmission and stump complications after major lower extremity amputation. *Journal of Vascular Surgery*. 2018;67(3):848-856. doi:10.1016/j.jvs.2017.08.061
114. Curran T, Zhang JQ, Lo RC, et al. Risk factors and indications for readmission after lower extremity amputation in the American College of Surgeons National Surgical Quality Improvement Program. *J Vasc Surg*. 2014;60(5):1315-1324. doi:10.1016/j.jvs.2014.05.050
115. Zambetti BR, Stiles ZE, Gupta PK, et al. Analysis of Early Lower Extremity Re-amputation. *Annals of Vascular Surgery*. 2022;81:351-357. doi:10.1016/j.avsg.2021.10.030
116. Limakatso K, Bedwell GJ, Madden VJ, Parker R. The prevalence and risk factors for phantom limb pain in people with amputations: A systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE*. 2020;15(10):e0240431. doi:10.1371/journal.pone.0240431
117. Grzebień A, Chabowski M, Malinowski M, Uchmanowicz I, Milan M, Janczak D. Analysis of selected factors determining quality of life in patients after lower limb amputation- a review article. *Pol Przegl Chir*. 2017;89(2):57-61. doi:10.5604/01.3001.0009.8980

ANNEXE

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 plaît 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 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.

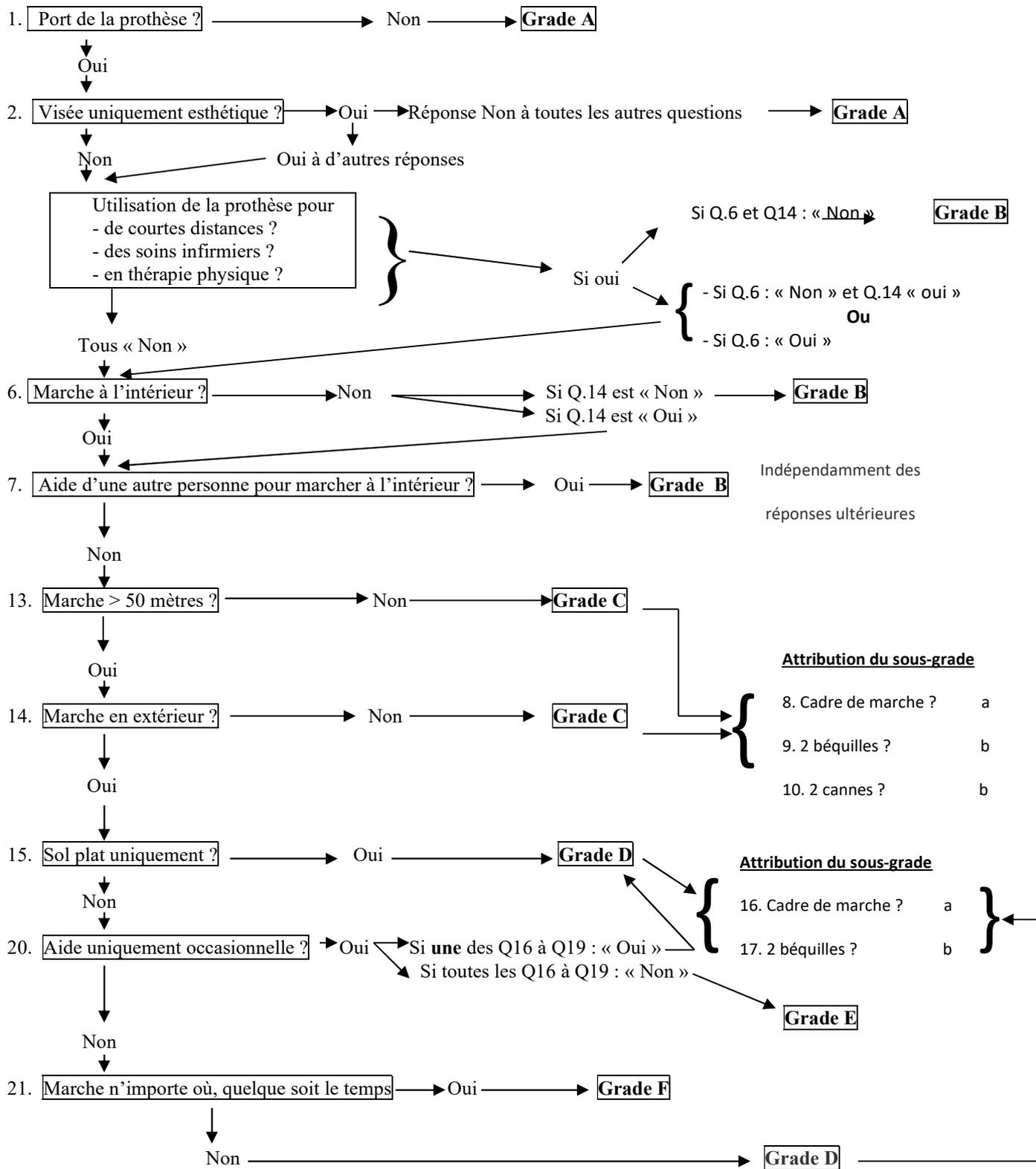
C : Marche uniquement sur un sol plat <50 mètres, avec ou sans l'utilisation d'aides à la marche: a = un cadre de marche (déambulateur), b = 2 béquilles / 2 cannes, c = 1 béquille / 1 canne, d = pas de canne ou de béquille.

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

SIGAM-Fr algorithm



AUTEUR : Nom : Ducheine

Prénom : Clément

Date de soutenance : 04 octobre 2022

Titre de la thèse : Batterie d'évaluation à l'effort aérobie, anaérobie et musculaire chez les sujets amputés de membre inférieur à la phase pré-prothétique : élaboration d'une étude pilote.

Thèse - Médecine - Lille - 2022

Cadre de classement : Médecine

DES + FST/option : Médecine Physique et de réadaptation FST Médecine du Sport

Mots-clés : évaluation, cardiorespiratoire, isocinétisme, pré prothétique, amputation

Résumé :

Contexte

L'amputation majeure de membre inférieur, est une pathologie fréquente, d'étiologie le plus souvent vasculaire, touchant des patients aux multiples comorbidités. L'issue de cette rééducation est influencée par de nombreux facteurs, dont font partie les capacités physiques. Ces capacités peuvent correspondre aux filières énergétiques aérobie, anaérobie lactique ou encore anaérobie alactique, et chacune de ces filières a un impact théorique ou prouvé dans la déambulation avec prothèse. Ainsi, leur évaluation lors de la phase pré-prothétique est importante.

Méthode

Nous avons effectué une revue de la littérature sur la base de données PUBMED, concernant les modalités validées d'évaluation des capacités aérobie, anaérobies et musculaires ainsi que d'évaluation de la marche des sujets ayant subi une amputation majeure de membre inférieur.

Résultats

Il n'existe à ce jour pas de batterie d'évaluation à l'effort aérobie, anaérobie et musculaire validée à la phase pré-prothétique. Nous proposons donc l'élaboration d'une telle batterie, se déroulant dans les six premières semaines après l'admission de patients ayant subi une amputation majeure de membre inférieur. L'évaluation aérobie se déroulera durant une épreuve d'effort incrémentale par rampe sur ergocyclomètre fauteuil en unijambiste, dont le résultat principal sera le pic de consommation en dioxygène (VO₂pic). L'épreuve anaérobie lactique et l'épreuve musculaire feront appel à une évaluation isocinétique du membre non amputé pour permettre leur réalisation indépendamment du niveau d'amputation. Le résultat principal sera le moment de force maximal du quadriceps lors de cinq répétitions pour l'évaluation musculaire, et le travail total de trente répétitions pour l'évaluation anaérobie. A l'issue de la rééducation, des tests de marche seront réalisés pour une appréciation quantitative avec le 2MWT et le TUG évaluation qualitative. La faisabilité de ce protocole d'évaluation à l'effort sera appréciée sur un échantillon de 20 patients, inclus consécutivement dans le service de Médecine Physique et de Réadaptation du CHRU de Lille.

Conclusion

Nous pensons qu'une batterie d'évaluation à l'effort sur sujet amputé de membre inférieur lors de la phase pré-prothétique est faisable et qu'il existe un intérêt médical, et pronostique en termes d'issue de la rééducation voire de morbi-mortalité.

Composition du Jury :

Président : Pr Julien GIRARD

Assesseurs : Pr André THEVENON, Dr Valérie WIECZOREK, Dr Frédéric CHARLATE

Directeur de thèse : Pr Vincent TIFFREAU