Les genoux prothétiques : avancées technologiques et modalités de prise en charge chez l'amputé militaire

M. Thomas-Pohl[a], D. Rogez[a], L. Borrini[a], D. Azoulay[b], L. Darmon[a], É. Lapeyre[a,c]

a Service de médecine physique et de réadaptation, Hôpital d'instruction des armées Percy, BP 406 – 92141 Clamart Cedex.
b Centre d'études et de recherche sur l'appareillage des handicapés, Antenne Créteil, 47 rue de l'Échat – 94000 Créteil.
c École du Val-de-Grâce, 1 place Alphonse Laveran – 75230 Paris Cedex 05.

Article reçu le 1er septembre 2014, accepté le 2 décembre 2014.

Résumé

Afin d'optimiser la récupération, l'autonomie et la réinsertion professionnelle des blessés militaires français victimes d'amputation traumatique, un appareillage technique de qualité est nécessaire. Les genoux à microprocesseur disponibles et remboursés restaurent en partie les capacités fonctionnelles du patient. Cependant les genoux dits de nouvelle génération, dotés d'une intelligence artificielle, permettent une marche quasi physiologique, efficace et sécurisante, et des activités supérieures de marche (descente et montée des escaliers, pentes, marche en terrains irréguliers, marche arrière, piétinement) performantes. C'est devant cet enjeu médico-technique que les instances médico-militaires, conscientes du bénéfice à apporter aux militaires, ont validé leur prise en charge financière. Elle s'applique sous conditions strictes, au profit des militaires blessés en opération ou en service, qui s'inscrivent dans un parcours de réinsertion professionnelle et dont le besoin et l'amélioration ont été préalablement validés par le service de santé des armées.

Mots-clés : Amputation transfémorale. Blessé militaire. Genoux de nouvelle génération. Prise en charge financière. Rééducation.

Abstract

PROSTHETIC KNEES: TECHNOLOGICAL ADVANCES AND CONDITIONS OF CARE MILITARY AMPUTEES.

Quality technical equipment is necessary for our French military amputees to better recover their autonomy and reinsert professionally properly. The microprocessor knees available and partially refunded today, restore the functional capacity of the patients. The new generation of prosthetic knees however, equipped with artificial intelligence, allow an almost physiological gait, effective and safe, as well as improved walking activities (downhill and climbing stairs, slopes, walking on rough terrain, reverse, trampling). Facing this medico-technical challenge, medical and military authorities quickly figured out how the military would benefit from this new technology: they validated their funding in favour of the military amputees who were injured in operation or service, are enrolled in a professional rehabilitation project, and whose needs have been approved by the medical military department.

Keywords : Transfemoral amputation. Injured soldier. New generation prosthesis. Refund. Rehabilitation.

Introduction

Le service de Médecine physique et de réadaptation (MPR) de l'Hôpital d'instruction des armées (HIA) Percy a pris en charge 43 amputés traumatiques militaires entre 2000 et 2012 dont 17 en opérations extérieures et 12 pour la seule opération « Pamir » en Afghanistan (1). Ce relatif afflux d'amputés jeunes et sportifs ces dernières années, associé à l'arrivée sur le marché de Prothèses de nouvelle génération (PNG), nous a conduits à leur proposer cette avancée technologique majeure. L'objectif est d'optimiser la récupération de l'autonomie du patient amputé, notamment transfémoral, dans ses activités de vie quotidienne, professionnelles, et ainsi s'inscrire dans un parcours de réadaptation et de réinsertion qui soit aussi un parcours de vie.

Le ministère de la Défense a récemment décidé la prise en charge financière des PNG (non remboursées par les organismes sociaux) dans le cadre d'un parcours de réinsertion professionnelle des militaires blessés en opérations ou en service.

M. THOMAS-POHL, médecin principal, praticien confirmé. D. ROGEZ, médecin en chef, praticien certifié. L. BORRINI, médecin, praticien certifié. D. AZOULAY, orthoprothésiste. L. DARMON, spécialiste de médecine physique et de réadaptation. É. LAPEYRE, médecin chef des services, professeur agrégé du Val-de-Grâce.
Correspondance : Madame le médecin principal M. THOMAS-POHL, Service de médecine physique et de réadaptation, Hôpital d'instruction des armées Percy, BP 406 – 92141 Clamart Cedex.
E-mail : thomas_marie@hotmail.com

Si l'interface moignon-emboiture est reconnue comme étant essentielle dans l'appareillage prothétique de l'amputé, la grande offre d'effecteurs intermédiaires et terminaux (fig. 1) disponibles pour l'amputé fémoral permet aujourd'hui de proposer à chaque patient la prothèse et en particulier le genou prothétique le plus adapté. Les avancées technologiques ouvrent le marché d'un nouveau type de prothèse, les genoux bioniques. Ceux-ci sont destinés à des patients très actifs et laissent envisager, après rééducation spécifique, une marche et des activités supérieures de marche (montée/descente de pentes, marche en dévers, montée et descente des escaliers, piétinement, marche arrière, etc.) plus physiologiques, grâce à l'intelligence artificielle qui permettrait d'anticiper les mouvements du patient. Ces

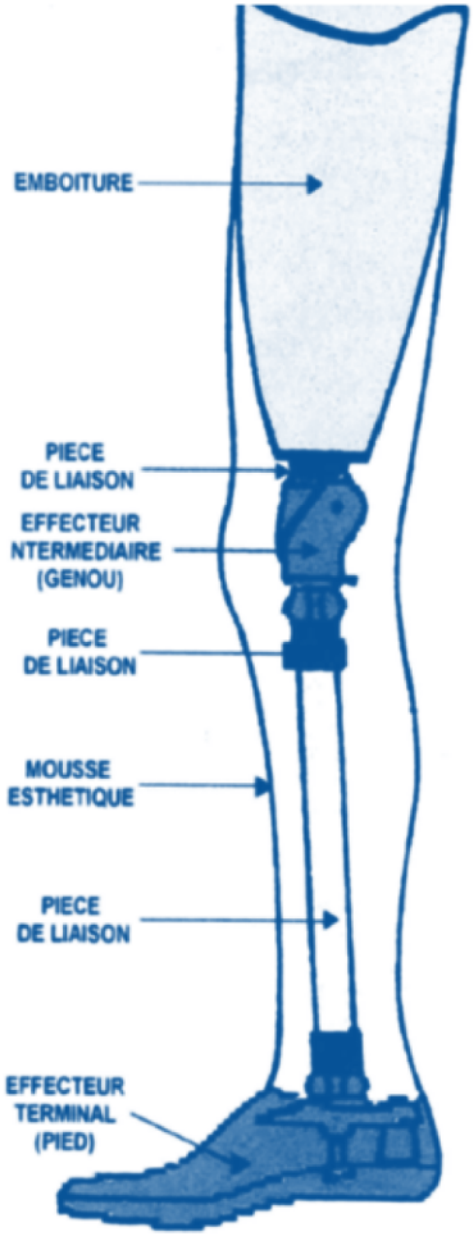


Figure 1. Schéma d'une prothèse de membre inférieur.

genoux bioniques, appelés aussi Genoux de nouvelle génération (GNG), ne sont actuellement pas inscrits à la Liste des produits et prestations remboursables (LPPR) par l'assurance maladie. Il en est d'ailleurs de même pour les mains de nouvelle génération. Ces genoux et ces mains prothétiques sont regroupés sous le terme de « Prothèses de nouvelle génération » ou « PNG ».

Prothèses actuelles remboursées

Le genou prothétique doit assurer à la fois la sécurité en phase d'appui mais aussi le maximum de mobilité à la phase pendulaire. Il doit permettre une marche efficace, sûre, fonctionnelle, performante et confortable. Le choix dépend du patient et de son niveau d'activité, du type d'utilisation souhaitée (déplacements simples en intra-domiciliaire, marche sur terrain plat, utilisation de pentes ou d'escaliers) et du niveau d'amputation (hauteur de la ligne de montage, etc.). Plusieurs types de genoux prothétiques sont disponibles pour les amputés fémoraux (2) :

– les genoux à axe simple et verrou : verrouillés en position debout, ils imposent une boiterie à la marche car ils nécessitent une ascension du bassin par le carré des lombes et/ou un fauchage pour passer le pas. Le passage du pas est donc difficile, la marche inesthétique, le pas postérieur inexistant et la consommation d'énergie importante. Le patient peut déverrouiller manuellement le genou pour permettre la position assise. La phase pendulaire est verrouillée non régulée. Ce type de genou assure la sécurité mais peu la mobilité ;

– les genoux libres parmi lesquels on distingue :

– les genoux avec contrôle statique de la phase d'appui : verrouillés en charge, ils sont sécurisants et permettent surtout la marche sur terrain plat. On retrouve les genoux à frein (l'angle de stabilisation du genou est compris entre 0 et 25°, au-delà il fléchit), les genoux à axe déporté (le blocage en phase d'appui se fait par le positionnement du centre de rotation du genou prothétique par rapport à la ligne de charge) et les genoux polycentriques à quatre axes (définis par l'arrangement géométrique des biellettes qui définissent la trajectoire du centre instantané de rotation du genou). Ces derniers permettent en phase pendulaire, par le jeu de croisement des biellettes, un raccourcissement du segment jambier pour améliorer le passage du pas,

– les genoux à 5 ou 7 axes : avec une préflexion en charge, les pentes inférieures à 15° sont possibles ; leur usage est polyvalent et permet sécurité et mobilité,

– les genoux avec contrôle dynamique de la phase d'appui : grâce à un freinage progressif sous l'effet de la charge, leur utilisation est possible dans les pentes et escaliers, et grâce au contrôle dynamique de la phase pendulaire, ils permettent des variations importantes de cadence. Parmi ceux-ci, on retrouve les genoux hybrides et les genoux à gestion électronique de la phase d'appui et pendulaire. Ils assurent sécurité et mobilité.

Jusqu'à l'arrivée des genoux bioniques, le « *gold standard* » chez l'amputé actif restait le genou à microprocesseur, avec gestion électronique de la phase d'appui et pendulaire. Ces genoux, dont les chefs de file

sont le C-LEG® et le RHEOKNEE® (fig. 2), permettent un freinage en phase d'appui et une assistance en phase oscillante avec un retour du pied adapté à la vitesse de marche et à la longueur du pas (informations données par les différents capteurs d'angle et de force du genou prothétique). L'HYBRID-1P360® est un genou mono-axial, à phase pendulaire pneumatique asservie par microprocesseur et à phase d'appui gérée par frein rotatif hydraulique, qui offre le même service que les deux genoux suscités.



Figure 2. Genoux à microprocesseurs (C-LEG® et le RHEOKNEE®) et de nouvelle génération (POWERKNEE® et GENIUM®).

Ces genoux n'apportaient pas qu'une avancée technologique. Les études de Bunce (3) en 2007 et Swanson en 2005 (4) montraient que les patients, en passant d'un genou mécanique au C-LEG®, notaient non seulement une amélioration de la fluidité et de la qualité de la marche, mais aussi une marche plus physiologique. Le contrôle inconscient de leur prothèse permettait d'améliorer leur schéma corporel et d'intégrer plus facilement leur prothèse.

En revanche, ces genoux avec contrôle dynamique de la phase d'appui ne permettent pas de monter les escaliers à pas alternés (fig. 3), de reculer (la marche arrière est pourtant très utile dans des activités quotidiennes comme ouvrir une porte en la tirant ou lors des multiples petits déplacements pour préparer un repas) ou de maintenir une station debout prolongée « physiologique » (genou légèrement fléchi). Leurs performances sont donc perfectibles.



Figure 3. Montée des escaliers à pas alterné.

Avancées technologiques sur les genoux nouvelle génération dits « bioniques »

Depuis peu, ont été mis au point des genoux « bioniques » (POWERKNEE® par Ossür et GENIUM® par Ottobock) ou GNG. Leur caractéristique principale est leur « intelligence artificielle » qui permet d'anticiper la réponse la mieux adaptée pour le patient afin de rendre la marche la plus physiologique possible. Le genou POWERKNEE® est actuellement le seul genou motorisé (5). Il permet une phase pendulaire active avec le soulèvement actif du talon et la flexion motorisée du genou au départ permettant le passage du pas sans fauchage. L'extension motorisée à la fin de la phase pendulaire permet de compenser d'éventuels trébuchements. La poussée est motorisée en pente tout comme dans l'ascension des escaliers. Par ses mouvements semi-automatiques, il permet une diminution de la dépense énergétique et est particulièrement bien adapté chez l'amputé transfémoral bilatéral. Le GENIUM® (6) permet quant à lui une marche fluide mimant la marche physiologique, par sa préflexion de genou de 4° à l'attaque du pas, son assistance en phase d'appui dite *yielding* (contrôle d'une flexion naturelle jusqu'à 17°) et une flexion fixe de 65° en phase pendulaire quelle que soit la vitesse de marche pour augmenter la garde au sol et limiter les trébuchements. Lui aussi possède une fonction de montée automatique des escaliers.

Selon les fabricants, ces deux genoux permettent en pratique, en plus de s'adapter à la vitesse de marche de façon plus performante que les genoux précités et d'améliorer la marche sur terrains irréguliers, de monter les escaliers en alternance de pas, de reculer et de franchir des obstacles du côté sain ou du côté prothésé sans fauchage. Une seule étude indépendante de 2012 (7) compare les performances du C-LEG® et du GENIUM®. Bellman étudie onze patients appareillés par C-LEG® qui bénéficient d'un genou GENIUM® à l'essai. Après une journée d'entraînement spécifique, elle montre à très court terme des améliorations statistiquement significatives : l'amélioration de la symétrie du pas à vitesse lente et rapide, l'augmentation de la charge possible côté appareillé lors de la station debout prolongée en pente avec le GENIUM® et ainsi la diminution des contraintes sur le membre sain, l'amélioration de la flexion du genou GENIUM® lors de la descente d'escaliers de pentes et la montée d'escaliers en pas alternés possible avec le GENIUM®.

Ils nécessitent une rééducation adaptée (pour maîtriser le contrôle de la prothèse et ses fonctions automatiques) et leur prescription intervient actuellement après un

appareillage plus classique. Les patients sont en effet appareillés par étapes, initialement avec un genou assurant la sécurité afin de bénéficier de la rééducation des fondamentaux (8, 9) (mise en charge stable sur la prothèse en phase d'appui, mobilité en phase pendulaire, proprioception du couple moignon-emboîture, travail de la marche et réentrainement à l'effort, etc.) et de préparer au mieux le moignon pour un appareillage définitif plus actif (tolérance cutanée, remodelage du moignon, renforcement musculaire). La rééducation passe ensuite par l'apprentissage et l'automatisation des fonctions de la prothèse afin de maîtriser ses fonctionnalités. Dans un second temps, la rééducation des patients avec un genou à contrôle dynamique de la phase d'appui à micro-processeur ou avec un genou bionique insiste sur le travail de l'équilibre et de la proprioception pour permettre le travail de la marche (fluidité et changement de cadence) sur terrains variés (terrains stables et instables, en intérieur et extérieur, franchissement d'obstacles), les pentes et les escaliers. Par l'apprentissage et l'accumulation des données, ces types de genou s'adaptent de mieux en mieux et de plus en plus rapidement aux besoins et caractéristiques du patient. Cette rééducation doit également corriger les compensations acquises avec les prothèses de genoux utilisées précédemment et appréhender au mieux le contrôle de la phase d'appui. La montée de pentes raides et la marche en dévers côté amputé en amont restent difficiles (entre autres par le choix de l'association du pied prothétique).



Figure 4. Passage de la position assise à debout en symétrique.

Le suivi de trois patients militaires français (10) amputés post-traumatiques en opérations a montré que ces genoux bioniques ont permis d'améliorer leurs capacités fonctionnelles au quotidien (confort de marche sur terrain plat et/ou instable à vitesse variable, sans délai d'adaptation, permettant une marche quasi physiologique dans la vie quotidienne avec un périmètre de marche quasi-illimité, un franchissement d'obstacles y compris côté appareillé de façon naturelle et inconsciente sans réduction de la vitesse de marche, piétinement et marche arrière à petits pas désormais possibles) et en activités de loisirs (descente de pentes raides, activités de montagne).

Ce genou complètement intégré au schéma corporel leur a également permis d'« oublier le handicap ». Le contrôle inconscient de la prothèse et l'intégration de la prothèse au schéma corporel sont des éléments déjà rapportés dans deux études (3, 4).

Bien que la rééducation ait été *a priori* suffisante, certaines compensations et habitudes acquises avec des genoux précédents persistent. Alors que le GNG permet de passer de la position assise à debout de manière symétrique (fig. 4), la majorité des patients continue de n'utiliser que leur jambe valide en situation écologique (9, 11). De même, certaines autres fonctions étaient sous-utilisées, telles que la montée des escaliers en pas alternés, peut-être par un manque de rééducation spécifique et/ou par la lourdeur du déclenchement peu intuitif de cette fonction (mouvement d'extension puis de flexion de la hanche). La modification des patterns de marche est longue et difficile lorsque d'autres habitudes de marche sont ancrées. La question d'un appareillage plus précoce avec ces prothèses est donc clairement posée pour limiter les compensations et défauts de marche acquis avec les prothèses mécaniques.

Par ailleurs, l'amélioration des fonctions automatiques motorisées de ces genoux est attendue et leur association à un type particulier de pied prothétique nécessite d'être étudiée pour optimiser la montée de pentes, devers et escaliers.

Modalités de prise en charge des PNG pour le blessé militaire français

Lors de la mise sur le marché en France en 2004-2005 des genoux à microprocesseurs, de nombreuses études se sont intéressées à l'évaluation de ceux-ci (cinétique, cinématique, performances dans les activités de la vie quotidienne, coût énergétique). Le C-LEG® était alors le chef de file avec des améliorations franches par rapport aux genoux mécaniques concernant la marche et la symétrie des pas (12, 13), la réduction des contraintes sur le membre sain (par diminution des compensations) et sur le membre appareillé en descente de pente ou d'escaliers (12-14) la diminution du coût énergétique (15-17) et la sécurité avec un risque moindre de chute (13, 18).

Des critères précis d'attribution (19, 20) et donc de remboursement ont été établis : périmètre de marche en continu supérieur à 2 km, vitesse de marche supérieure

ou égale à 4 km/h, descente d'un plan incliné d'au moins 15 % et descente d'escaliers à pas alternés.

Cependant, il n'existe pas de critères standardisés de validation et d'évaluation des GNG non-inscrits sur la LPPR. Leur coût à l'achat, avec contrat de maintenance, varie de 50 000 à 80 000 euros (pour un effecteur). Les patients en milieu civil ne peuvent alors en bénéficier le plus souvent qu'en cas d'accident avec tiers responsable grâce à un financement par leur assurance. La mise en place de critères de validation et d'évaluation de ces prothèses est un véritable enjeu médico-économique puisque susceptible de permettre à terme un remboursement sous conditions en secteur civil.

Lors de la prise en charge récente de nombreux blessés en OPEX, les limites des prothèses existantes ont rapidement été atteintes par ces hommes jeunes, sportifs et dynamiques. Les demandes du Service pour leur faire bénéficier des PNG ont reçu un accueil très favorable des instances et associations œuvrant au profit des combattants, dans le contexte du droit à réparation de ces blessés de guerre. C'est ainsi qu'un fond exceptionnel de financement mixte, étatique et associatif (Terre Fraternité, Solidarité Défense), Office national des anciens combattants (ONAC), Caisse nationale militaire de sécurité sociale (CNMSS), mutuelle UNEO et mutuelle nationale militaire (MNM)), a permis dès 2013 le financement de PNG pour six patients (3 prothèses de genoux + 3 prothèses de mains). Par la suite, le travail d'une commission réunissant le Service de santé des armées, le ministère de la Défense et les directions de la CNMSS et MNM a abouti à la rédaction d'une charte (21) signée le 1er juillet 2014. Celle-ci définit les modalités de prises en charge des PNG au profit des militaires blessés.

Ce financement est accordé « aux militaires blessés en opération ou en service, qui s'inscrivent dans un parcours de réinsertion professionnelle et dont le besoin a été préalablement validé par le Service de santé des armées » (par l'intermédiaire de l'HIA Percy).

Trois critères sont indispensables à la prise en charge par la CNMSS :

– le militaire blessé doit être « appareillé et appareillable ».

– il doit « posséder les capacités physiques et cognitives lui permettant d'assimiler la technique d'utilisation de la prothèse et d'en assurer la maîtrise ».

– et il doit pouvoir « reprendre un emploi dans l'institution militaire ou dans le civil à l'issue du processus ».

Actuellement, dans le service, la validation médicale pour la prescription de ces GNG a lieu après concertation collégiale, expérimentale et pluridisciplinaire (médecins rééducateurs, orthoprothésistes du Centre d'études et de recherche sur l'appareillage des handicapés (CERAH), kinésithérapeutes, ergothérapeutes), incluant le ressenti du patient.

L'évaluation porte sur la qualité de la marche (fluidité, variation de vitesse, etc.), les activités supérieures de marche (escaliers, pentes, terrains irréguliers, etc.), la sécurité offerte et la fatigue ressentie, sans chiffrage objectif.

Conclusion

Contrairement aux amputés des grands conflits du 20e siècle, qui avaient « donné » leur jambe pour leur patrie et n'hésitaient pas à le montrer par le port d'un pilon en bois, les militaires blessés du 21e siècle ont des exigences importantes en matière d'appareillage. Si les genoux à microprocesseur ont en partie restauré leurs capacités fonctionnelles, les GNG proposent une amélioration tant mécanique que psychologique, se rapprochant d'une marche quasi physiologique, efficace et sécurisante. C'est devant cet enjeu médico-technique que les instances médico-militaires, rapidement conscientes du bénéfice apporté aux militaires, ont validé leur prise en charge financière sous conditions. Une rééducation spécifique est nécessaire afin de maîtriser au mieux toutes les fonctions.

Bien que le pourcentage de jeunes amputés traumatiques reste faible dans les pays développés, des études sur une population plus large (cinétique et cinématique de marche, coût énergétique, aspects psychosociaux) permettraient la validation de critères d'évaluation et de prescription de ces nouvelles prothèses ainsi que leur inscription à la LPPR.

Les auteurs ne déclarent pas de conflit d'intérêt concernant les données présentées dans cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Sejourne-Martino M. Réadaptation et réinsertion des amputés dans le Service de médecine physique et de réadaptation de l'Hôpital d'Instruction des Armées Percy : analyse d'une cohorte de 129 patients entre 2000 et 2012 [Thèse de Doctorat en Médecine]. Paris : Université Paris XI faculté de médecine paris-sud 2014.
2. Azoulay D, Fode P, Cazorla C, Kouvtanovitch J, Sautreuil P, Fillonneau D. Caractéristiques techniques des genoux prothétiques. Lett Med Phys Readapt 2010;26:110-7.
3. Bunce DJ, Breakey JW. The impact of C-Leg® on the physical and psychological adjustment to transfemoral amputation. JPO 2007; 19:7-14.
4. Swanson E, Stube J, Edman P. Function and body image levels in individuals with transfemoral amputations using the C-Leg®. JPO 2005;17:80-4.
5. http://www.ossur.fr/juin 2014.
6. http://www.ottobock.fr/juin 2014.
7. Bellmann M, Schmalz T, Ludwigs E, Blumentritt S. Immediate effects of a new microprocessorcontrolled prosthetic knee joint : a comparative biomechanical evaluation. Arch Phys Med Rehabil 2012;93:541-9.
8. Cristina MC, Fraudet B, Colleaux A, Fillonneau D, Brugalais L, Loussot D. Rééducation de l'amputé fémoral en fonction du type de genou prothétique. Lett Med Phys Readapt 2010;26:118-27.
9. De Roy K. Techniques de rééducation des amputés transfémoraux en utilisant des pieds prothétiques avec restitution d'énergie. Lett Med Phys Readapt 2009;25:175-81.
10. Thomas-Pohl M, Rogez D, Thefenne L, Azoulay D, Lapeyre E. De l'amputation fémorale à la prothèse bionique : expérience de trois militaires français. Lett Med Phys Readapt 2013;29(4):227-36.
11. Highsmith J, Kahle JT, Carey SL, Lura DJ, Dubey RV, Csavina KR, et al. Kinetic asymmetry in transfemoral amputees while performing sit to stand and stand to sit movements. Gait & Posture 2011;34:86-91.
12. Bellmann M, Schmalz T, Blumentritt S. Comparative biomechanical analysis of current microprocessor controlled prosthetic knee joints. Arch Phys Med Rehabil 2010;91:644-52.
13. Hafner BJ, Willingham LL, Buell NC, Allyn KJ, Smith DG. Evaluation of function, performance, and preference as transfemoral amputees transition from mechanical to microprocessor control of the prosthetic knee. Arch Phys Med Rehabil 2007;88:207-17.
14. Schmalz T, Blumentritt S, Jarasch R. Energy expenditure and biomechanical characteristics of lower limb amputee gait : the influence of prosthetic alignment and different prosthetic components. Gait Posture 2002;16:255-63.
15. Kaufmann KR, Levine JA, Brey RH, Iverson BK, McCrady SK, Padgett DJ, et al. Gait and balance of transfemoral amputees using passive mechanical and microprocessor controlled prosthetic knees. Gait Posture 2007;26:489-93.
16. Seymour R, Engbertson B, Kott K, Ordway N, Brooks G, Crannell J, et al. Comparison between C-Leg® microprocessor-controlled prosthetic knee and nonmicroprocessor control prosthetic knee : a preliminary study of energy expenditure, obstacle course performance, and quality of life survey. Prosthet Orthot Int 2007;31:51-61.
17. Chin T, Machida K, Sawamura S, Shiba R, Oyabu H, Nagakura Y, et al. Comparison of different microprocessor controlled knee joints on the energy consumption during walking in trans-femoral amputees: intelligent knee prosthesis (IP) versus C-Leg®. Prosthet Orthot Int 2006;30:73.
18. Blumentritt S, Schmalz T, Jarasch R. The safety of C-Leg®: biomechanical tests. J Prosthet Orthot 2009;21:2-15.
19. Haute Autorité de santé. Avis de la commission nationale d'évaluation des dispositifs médicaux et des technologies de santé : 3C100 C-Leg® du 24 novembre 2009.
20. Haute Autorité de santé. Avis de la commission nationale d'évaluation des dispositifs médicaux et des technologies de santé : Rheo-Knee® du 22 mars 2011.
21. Charte relative à la prise en charge d'appareillages de dernière génération au profit de militaires blessés en service ou en opération en date du 1er juillet 2014.