
Chapitre 3 Résultats

3.1 Variables cliniques

3.1.1 Patients hémiparétiques

3.1.2 Patients atteints de gonarthrose et ayant bénéficié d'une arthroplastie

3.2 Variables spatio-temporelles

3.2.1 Diminution de la vitesse

3.2.2 Augmentation de la fréquence et diminution de la longueur du cycle

3.2.3 Asymétrie de fréquence et de longueur des pas

3.3 Dépense énergétique

3.3.1 Augmentation de la puissance métabolique

3.3.2 Augmentation du coût énergétique

3.4 Travail mécanique externe

3.4.1 Tracés types des variations temporelles d'énergie du centre de masse corporel

3.4.2 Augmentation du travail mécanique externe

3.4.3 Préservation du mécanisme pendulaire

3.5 Travail mécanique interne

3.5.1 Tracés types des variations temporelles d'énergie des segments corporels

3.5.2 Augmentation du travail mécanique interne

3.6 Travail mécanique total

3.6.1 Tracés types des variations temporelles d'énergie du corps entier

3.6.2 Augmentation du travail mécanique total

3.7 Puissance mécanique

3.8 Rendement de la production du travail mécanique positif

3.1 Variables cliniques

3.1.1 Patients hémiparétiques

Etant donné que la vitesse de marche spontanément adoptée par les patients hémiparétiques varie considérablement entre les patients (de 1.7 à 3.6 km h⁻¹, voir Figure 3-1), les résultats des variables cliniques sont présentés pour les patients les plus lents (< 2.5 km h⁻¹, $n = 4$) et pour les patients plus rapides (≥ 2.5 km h⁻¹, $n = 5$).

Les patients les plus lents présentent une médiane au score d'Ashworth de 3 (2-3, 25^{ème}-75^{ème} percentiles) et celle des patients les plus rapides est de 1 (0-1).

La médiane du score du « Stroke Impairment Assessment Set » (SIAS) est de 52 (44-59) pour les patients les plus lents et de 68 (67-68) pour les patients les plus rapides.

Finalement, la médiane du score total de la Mesure de l'Indépendance Fonctionnelle (MIF) est de 120 (117.5-122.5) pour les patients les plus lents et de 124 (123-126) pour les patients les plus rapides. La médiane du score moteur de la MIF est de 73 (72.5-73.5) pour les patients les plus lents et de 77 (77-77) pour les patients les plus rapides.

3.1.2 Patients atteints de gonarthrose et ayant bénéficié d'une arthroplastie

Les patients atteints de gonarthrose présentent une médiane concernant la douleur du genou de 4.6 (3.7-4.8) qui diminue de manière significative ($\chi^2 = -45$, $p = 0.004$) en postopératoire à 0.5 (0.0-0.8).

Les scores de la « Knee Society » sont également améliorés. La médiane du score du genou augmente de manière significative ($\chi^2 = 45$, $p = 0.004$), passant de 44.0 (40.3-46.8) à 92.0 (88.8-94.3). La médiane du score de fonction augmente de manière significative ($\chi^2 = 45$, $p = 0.004$), passant de 50.0 (32.5-60.0) à 100.0 (90.0-100.0).

3.2 Variables spatio-temporelles

Les Figures 3-1 à 3-3 et le Tableau 3-1 présentent les variables spatio-temporelles de la marche des patients. Comme mentionné précédemment, tous les patients marchent à leur vitesse et fréquence du pas spontanées. Les principales perturbations des variables spatio-temporelles par rapport à la marche de sujets sains sont les suivantes: une diminution de la vitesse de marche, une augmentation de la fréquence et une diminution de la longueur du cycle de marche, une asymétrie de fréquence et de longueur du pas entre le membre inférieur atteint (MI_A) et le membre inférieur non atteint (MI_{NA}).

3.2.1 Diminution de la vitesse

La vitesse de marche moyenne est de $2.63 \pm 0.7 \text{ km h}^{-1}$ chez les patients hemiparétiques, $2.38 \pm 0.4 \text{ km h}^{-1}$ chez les patients atteints de gonarthrose, $3.17 \pm 0.5 \text{ km h}^{-1}$ chez les patients ayant bénéficié d'une arthroplastie du genou, $2.49 \pm 0.8 \text{ km h}^{-1}$ chez les patients amputés trans-tibiaux (TT) et $3.25 \pm 1.2 \text{ km h}^{-1}$ chez les trans-fémoraux (TF). Les vitesses moyennes atteintes par les patients sont nettement inférieures (1.28 m s^{-1} ou 4.61 km h^{-1}) à celles obtenues par Larsson *et al.* (1980) chez un groupe de sujets sains de même tranche d'âge.

Suite à l'arthroplastie du genou, la vitesse de marche des patients augmente de manière hautement significative (t pairé ; degrés de liberté (dl) = 8, $t = -4.139$, $p = 0.003$).

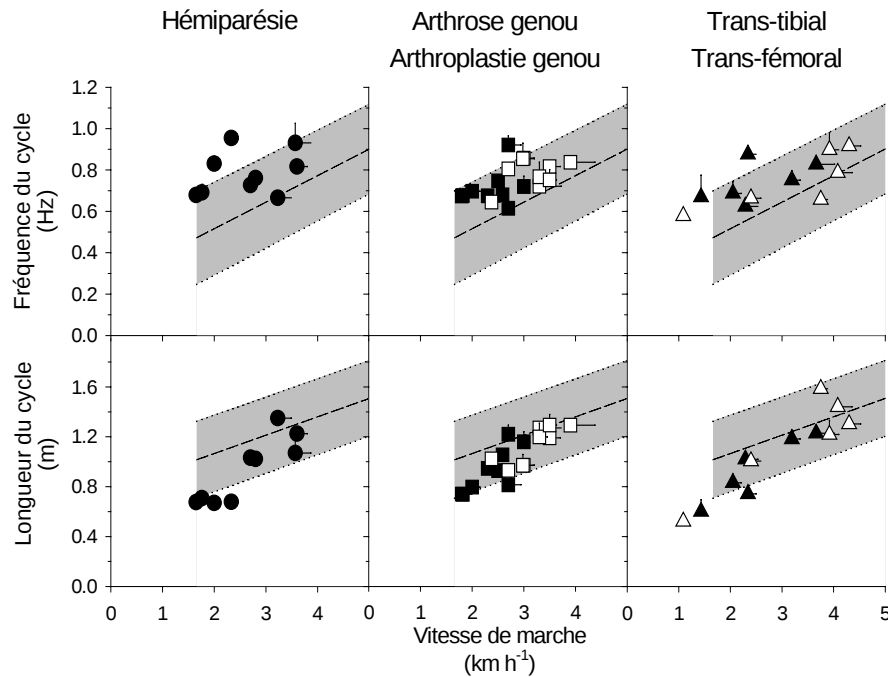


Figure 3-1

Fréquence (haut) et longueur (bas) du cycle de marche des patients en fonction de la vitesse de marche. Chaque symbole représente la valeur moyenne obtenue chez un patient. Les barres représentent les écarts-type lorsqu'ils dépassent la taille des symboles. Arthrose genou et arthroplastie genou : les carrés pleins représentent les patients atteints d'arthrose du genou et les carrés ouverts les mêmes patients ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou. Trans-tibial et trans-fémoral : les triangles pleins représentent les patients amputés trans-tibiaux et les triangles ouverts les amputés trans-fémoraux. Les lignes interrompues représentent les ajustements de fonctions linéaires sur des valeurs moyennes obtenues chez des sujets sains et les lignes pointillées représentent les ajustements d'une même fonction sur ces valeurs moyennes ± 2 écarts-type (Larsson *et al.*, 1980).

3.2.2 Augmentation de la fréquence et diminution de la longueur du cycle

D'une manière générale, les patients marchant à une vitesse proche ou supérieure à 3 km h⁻¹ ont une fréquence et une longueur du cycle normales. Plusieurs patients marchant à une vitesse inférieure à

3 km h⁻¹ présentent des valeurs de fréquence et de longueur du cycle en dehors des normes (Figure 3-1). Les normes présentées à la Figure 3-1 sont obtenues chez 23 sujets sains des deux sexes et âgés entre 20 et 70 ans, à qui l'on a demandé de marcher sur une piste de 22.8 m à 5 vitesses différentes : très lente, lente, ordinaire, rapide et très rapide (Larsson *et al.*, 1980). Les méthodologies utilisées pour obtenir ces normes peuvent être considérées comme similaires à celle de notre étude puisqu'elles ont été obtenues en conditions de laboratoire à l'aide de contacteurs fixés aux pieds des sujets.

Deux des quatre patients hémiparétiques les plus lents ont une fréquence du cycle de marche supérieure à la norme (Figure 3-1). Un patient atteint de gonarthrose et un patient amputé TT ont également une fréquence du cycle supérieure à la norme. Dans l'ensemble, les patients les plus rapides utilisent une fréquence du cycle plus élevée. Suite à l'arthroplastie totale du genou, la fréquence du cycle de marche des patients augmente de manière significative (*t* pairé ; *dl* = 8, *t* = -2.386, *p* = 0.044). Les valeurs moyennes de la fréquence du cycle en fonction des différents déficits sont présentées dans le Tableau 3-1. La fréquence moyenne du cycle la plus basse est observée chez les patients atteints de gonarthrose et la plus haute chez les patients hémiparétiques et ceux ayant bénéficié d'une arthroplastie du genou.

Tout comme pour la fréquence, les patients les plus rapides utilisent une longueur du cycle plus grande (Figure 3-1). Les quatre patients hémiparétiques les plus lents ont une longueur du cycle inférieure à la norme. Un patient atteint de gonarthrose et trois patients

amputés (2 TT et 1 TF) ont également une longueur de cycle inférieure à la norme.

Suite à l'arthroplastie du genou, la longueur du cycle de marche des patients augmente de manière significative (t pairé ; $dl = 8$, $t = -2.536$, $p = 0.035$). Les valeurs moyennes de la longueur du cycle en fonction des différents déficits sont également présentées dans le Tableau 3-1. La longueur moyenne du cycle la plus petite est observée chez les patients amputés TT et la plus grande chez les TF.

Tableau 3-1 : Fréquence et longueur du cycle en fonction des déficits

	Fréquence du cycle (Hz) ($\bar{X} \pm s$)	Longueur du cycle (m) ($\bar{X} \pm s$)
Hémiplégie	0.78 ± 0.1	0.94 ± 0.3
Arthrose genou	0.71 ± 0.1	0.94 ± 0.2
Arthroplastie genou	0.78 ± 0.1	1.13 ± 0.1
Amputation TT	0.74 ± 0.1	0.93 ± 0.2
Amputation TF	0.75 ± 0.1	1.18 ± 0.4

$\bar{X}$: moyenne, s : écart-type, TT: trans-tibial, TF: trans-fémoral

La Figure 3-2 illustre l'augmentation de fréquence du cycle des patients associée à la diminution de longueur du cycle. L'augmentation de vitesse suite à l'arthroplastie du genou (Figure 3-1) semble être essentiellement liée à l'augmentation de la longueur du cycle de marche (Figure 3-2).

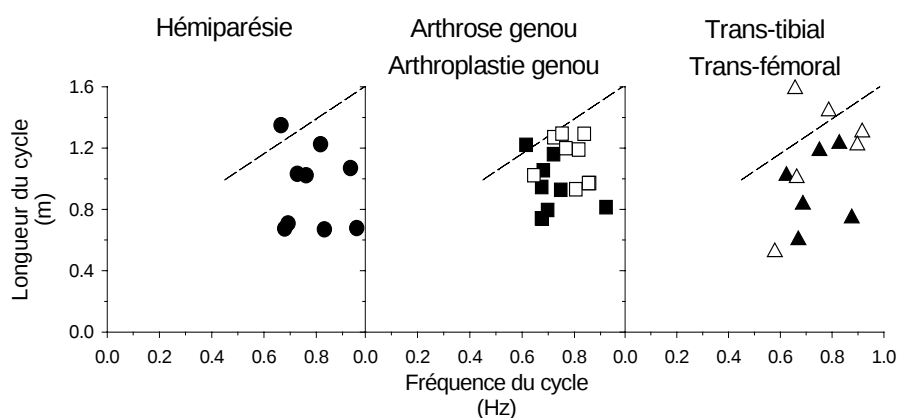


Figure 3-2

Diagramme entre la fréquence et la longueur du cycle de marche des patients. Chaque symbole représente la valeur moyenne obtenue chez un patient. Arthrose genou et arthroplastie genou : les carrés pleins représentent les patients atteints d'arthrose du genou et les carrés ouverts les mêmes patients ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou. Trans-tibial et trans-fémoral : les triangles pleins représentent les patients amputés trans-tibiaux et les triangles ouverts les amputés trans-fémoraux. Les lignes interrompues représentent des droites de régression ajustées sur les valeurs normales de la Figure 3-1.

3.2.3 Asymétrie de fréquence et de longueur des pas

Le Tableau 3-2 présente les résultats moyens de la fréquence et de la longueur des pas des patients en fonction des différents déficits et la Figure 3-3 montre l'asymétrie de fréquence et de longueur du pas entre le MI_A et le MI_{NA} . Une différence significative pour la fréquence est observée entre le MI_A et le MI_{NA} chez les patients hémi-parétiques (t pairé ; $dl = 8$, $t = 3.008$, $p = 0.017$) ainsi que chez les patients ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou (t pairé ; $dl = 8$, $t = 3.032$, $p = 0.016$). De même, une différence significative de longueur du pas est observée entre le MI_A et le MI_{NA} chez ces mêmes patients (respectivement : t pairé ; $dl = 8$, $t = -2.536$, $p = 0.035$; t pairé ; $dl = 8$, $t = -2.829$, $p = 0.022$). De plus, suite à l'arthroplastie totale du genou, la fréquence du pas du MI_A augmente de manière significative (t pairé ; $dl = 8$, $t = -2.327$, $p = 0.048$) ainsi que la

longueur du pas du MI_{NA} (t pairé ; $dl = 8$, $t = -3.114$, $p = 0.014$). De manière générale, la fréquence du pas du MI_A est supérieure à celle du MI_{NA} et la longueur du pas du MI_A est inférieure à celle du MI_{NA} (voir $MI_A MI_{NA}^{-1}$, Tableau 3-2 et Figure 3-3).

Tableau 3-2 : Fréquence et longueur des pas des patients pour le MI_A et le MI_{NA} en fonction des déficits

	MI_A $(\bar{X} \pm s)$	MI_{NA} $(\bar{X} \pm s)$	$MI_A MI_{NA}^{-1}$ $(\bar{X})$
Hémiplégie			
Fréquence pas (Hz)	1.78 ± 0.3	1.42 ± 0.3	1.25
Longueur pas (m)	0.41 ± 0.1	0.52 ± 0.2	0.79
Arthrose genou			
Fréquence pas (Hz)	1.44 ± 0.3	1.42 ± 0.2	1.01
Longueur pas (m)	0.46 ± 0.1	0.47 ± 0.1	0.98
Arthroplastie genou			
Fréquence pas (Hz)	1.64 ± 0.2	1.51 ± 0.1	1.09
Longueur pas (m)	0.54 ± 0.1	0.59 ± 0.1	0.91
Amputation TT			
Fréquence pas (Hz)	1.85 ± 0.7	1.38 ± 0.4	1.34
Longueur pas (m)	0.41 ± 0.2	0.52 ± 0.2	0.79
Amputation TF			
Fréquence pas (Hz)	1.90 ± 1.0	1.35 ± 0.2	1.41
Longueur pas (m)	0.52 ± 0.2	0.66 ± 0.2	0.79

MI_A : membre inférieur atteint, MI_{NA} : membre inférieur non atteint, $\bar{X}$: moyenne, s : écart-type, TT : trans-tibial, TF : trans-fémoral

Résultats

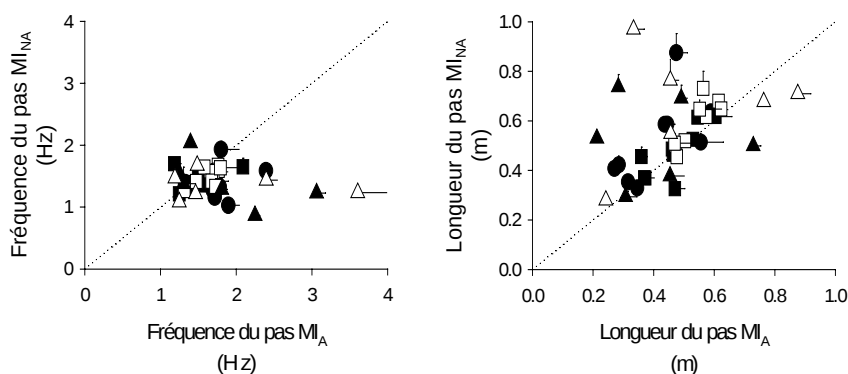


Figure 3-3

Fréquence et longueur des pas des membres inférieurs atteints (MI_A) et des membres inférieurs non atteints (MI_{NA}). Chaque symbole représente la valeur moyenne obtenue chez un patient. Les barres représentent les écarts-type lorsqu'ils dépassent la taille des symboles. Arthrose genou et arthroplastie genou : les carrés pleins représentent les patients atteints d'arthrose du genou et les carrés ouverts les mêmes patients ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou. Trans-tibial et trans-fémoral : les triangles pleins représentent les patients amputés trans-tibiaux et les triangles ouverts les amputés trans-fémoraux. Les lignes pointillées représentent les droites d'identité.

3.3 Dépense énergétique

Les résultats de la dépense énergétique des patients sont présentés dans les Figures 3-4 à 3-6 et au Tableau 3-3. Les perturbations principales de la dépense énergétique sont une augmentation de la puissance métabolique et du coût énergétique des patients.

3.3.1 Augmentation de la puissance métabolique

La puissance métabolique développée par les patients en station debout sur le tapis roulant sans marcher est présentée à la Figure 3-4. La puissance métabolique des patients en station debout est normale ou à peine augmentée par rapport à une valeur moyenne de $21 \text{ cal kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ obtenue chez des sujets sains des deux sexes (Molen

et Rozendal, 1967 cité par Rose et Gamble, 1994), c'est-à-dire 1.46 W kg^{-1} .

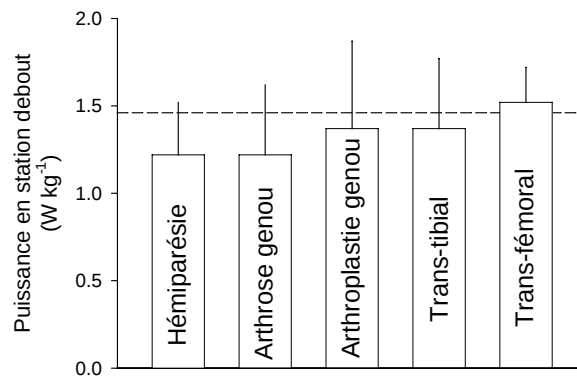


Figure 3-4

Puissance métabolique développée par les patients en station debout sur le tapis roulant sans marcher. Chaque rectangle représente la valeur moyenne obtenue dans chaque groupe de patients. Les barres verticales représentent les écarts-type. La ligne interrompue représente une valeur moyenne calculée à partir de données acquises chez des sujets sains (Molen et Rozendal, 1967).

Les puissances métaboliques brute et nette des patients en fonction de la vitesse de marche sont présentées à la Figure 3-5. Les puissances métaboliques brute et nette sont plus importantes quand la vitesse de marche est plus importante. Au cours de la marche, les puissances métaboliques brute et nette de presque tous les patients sont supérieures aux normes (Figure 3-5). Les normes présentées à la Figure 3-5 sont obtenues chez 6 sujets sains des deux sexes et âgés de 24 ± 3 ans, à qui l'on a demandé de marcher sur une piste circulaire de 25 m de long et de 1 m de large à différentes vitesses comprises entre 0.5 et 2.3 m s^{-1} (1.80 et 8.28 km h^{-1} ; DeJaeger *et al.*, 2001). Les méthodologies utilisées pour obtenir ces normes peuvent être considérées comme similaires à celles de notre étude puisqu'elles ont été obtenues par un système de mesure télémétrique de la

consommation d'O₂ (K4, Cosmed, Italie) équivalent à celui utilisé dans cette étude.

Les valeurs moyennes des puissances métaboliques brute et nette en fonction des différents déficits sont présentées dans le Tableau 3-3. Les puissances métaboliques moyennes les plus basses sont observées chez les patients hémiparétiques et les plus hautes chez les amputés TF.

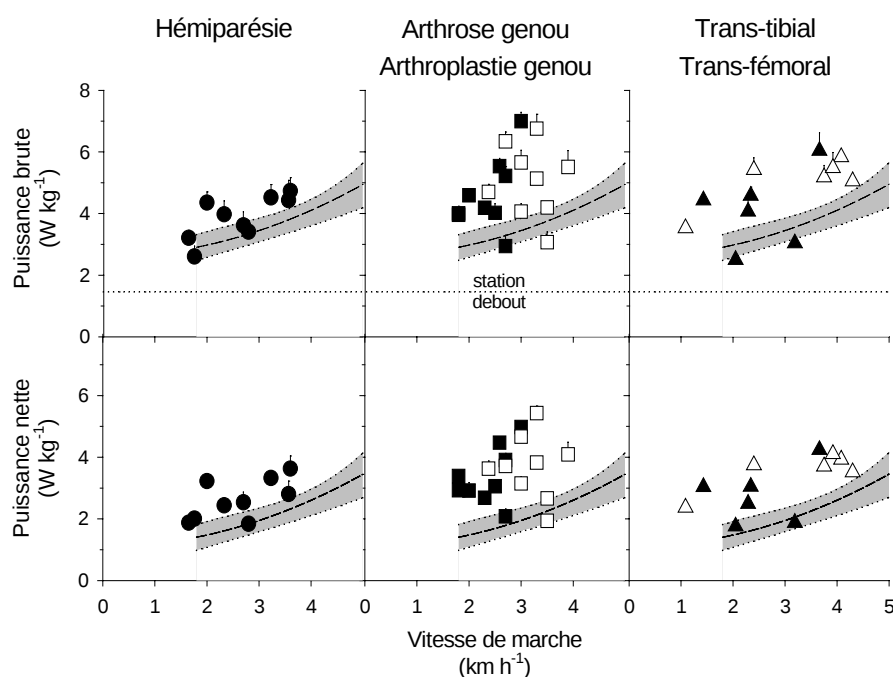


Figure 3-5

Puissance métabolique brute (haut) et nette (bas) des patients en fonction de la vitesse de marche. Chaque symbole représente la valeur moyenne obtenue chez un patient. Les barres représentent les écarts-type lorsqu'ils dépassent la taille des symboles. Arthrose genou et arthroplastie genou : les carrés pleins représentent les patients atteints d'arthrose du genou et les carrés ouverts les mêmes patients ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou. Trans-tibial et trans-fémoral : les triangles pleins représentent les patients amputés trans-tibiaux et les triangles ouverts les amputés trans-fémoraux. Station debout : norme de la puissance développée pour maintenir la station debout sans marcher (Molen et Rozendal, 1967). Les lignes interrompues représentent les ajustements de fonctions polynomiales du second degré sur des valeurs moyennes obtenues chez des sujets sains et les lignes pointillées représentent les ajustements d'une même fonction sur ces valeurs moyennes ± 2 écarts-type (DeJaeger et al., 2001).

Tableau 3-3 : Puissances métaboliques brute et nette en fonction des déficits

	Puissance brute (W kg^{-1}) ($\bar{X} \pm s$)	Puissance nette (W kg^{-1}) ($\bar{X} \pm s$)
Hémiplégie	3.87 ± 0.7	2.63 ± 0.7
Arthrose genou	4.61 ± 1.2	3.38 ± 0.9
Arthroplastie genou	5.05 ± 1.2	3.68 ± 1.0
Amputation TT	4.11 ± 1.2	2.74 ± 0.9
Amputation TF	5.08 ± 0.8	3.56 ± 0.6

$\bar{X}$: moyenne, s : écart-type, TT: trans-tibial, TF: trans-fémoral

3.3.2 Augmentation du coût énergétique

Le coût énergétique (C) de la marche des patients en fonction de la vitesse de marche ainsi que le ratio entre ce dernier et la norme (C_N) sont présentés à la Figure 3-6. En fonction de la vitesse de marche, C de presque tous les patients est supérieur à la norme (Figure 3-6). Les normes présentées à la Figure 3-6 sont celles obtenues par DeJaeger *et al.* (2001).

Seulement 6 patients (1 patient hémiplégique, 1 patient atteint de gonarthrose, 2 patients ayant bénéficié d'une arthroplastie du genou et 2 patients amputés TT) ont un C normal en fonction de leur vitesse de marche. De manière générale, l'augmentation du C dépend de la vitesse de marche. En effet, chez les patients atteints de gonarthrose et ayant bénéficié d'une arthroplastie et chez les patients amputés, l'augmentation du $C C_N^{-1}$ est moindre quand la vitesse de marche est plus importante. Cependant, cette tendance n'est pas aussi marquée chez les patients hémiplégiques. Suite à l'arthroplastie du genou, C des patients diminue de manière significative (t pairé; $df = 8$, $t = 2.557$, $p = 0.034$). Les valeurs moyennes du C et son augmentation

par rapport à C_N en fonction des différents déficits sont présentées dans le Tableau 3-4. Le coût énergétique le plus bas est observé chez les patients hémiparétiques et le plus haut chez les patients atteints de gonarthrose. Ces augmentations du coût énergétique correspondent respectivement à environ 1.5 et 2 fois la normale.

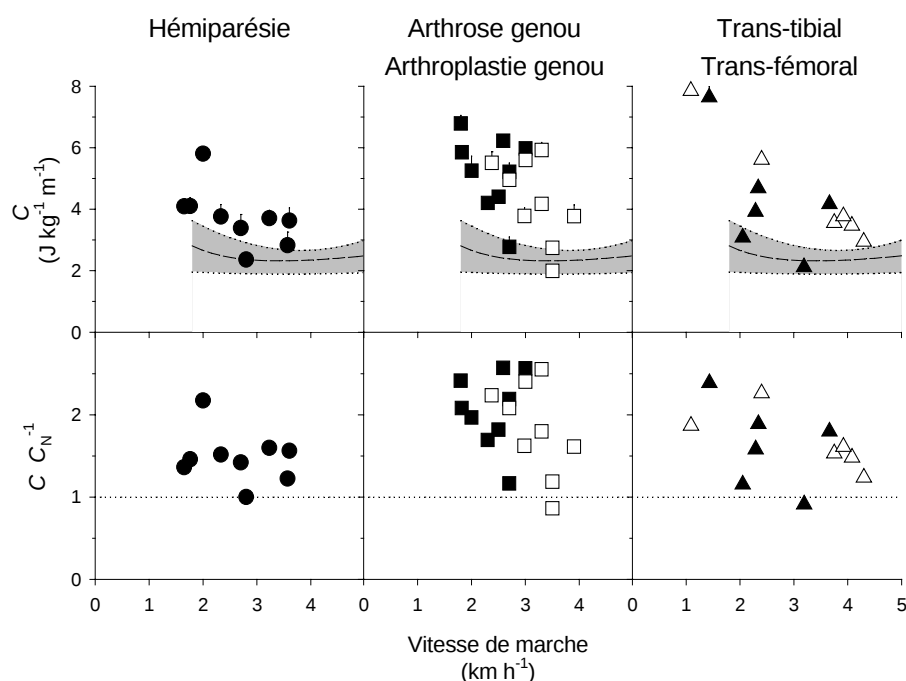


Figure 3-6

Coût énergétique de la marche des patients (haut) et ratio entre le coût énergétique et la normale (bas) en fonction de la vitesse de marche. Chaque symbole représente la valeur moyenne obtenue chez un patient. Les barres représentent les écarts-type lorsqu'ils dépassent la taille des symboles. Arthrose genou et arthroplastie genou : les carrés pleins représentent les patients atteints d'arthrose du genou et les carrés ouverts les mêmes patients ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou. Trans-tibial et trans-fémoral : les triangles pleins représentent les patients amputés trans-tibiaux et les triangles ouverts les amputés trans-fémoraux. Dans les graphiques du haut, les lignes interrompues représentent les ajustements d'une fonction polynomiale du second degré sur des valeurs moyennes obtenues chez des sujets sains et les lignes pointillées représentent les ajustements d'une même fonction sur ces valeurs moyennes ± 2 écarts-type (DeJaeger *et al.*, 2001).

Tableau 3-4 : Coût énergétique et son augmentation par rapport à la norme en fonction des déficits

	$C \text{ (J kg}^{-1} \text{ m}^{-1})$ $(\bar{X} \pm s)$	$C C_N^{-1}$ $(\bar{X} \pm s)$
Hémiplégie	3.74 ± 1.0	1.48 ± 0.3
Arthrose genou	5.19 ± 1.2	2.05 ± 0.4
Arthroplastie genou	4.27 ± 1.4	1.82 ± 0.6
Amputation TT	4.27 ± 1.9	1.62 ± 0.5
Amputation TF	4.53 ± 1.9	1.67 ± 0.4

$\bar{X}$: moyenne, s : écart-type, TT: trans-tibial, TF: trans-fémoral

3.4 Travail mécanique externe de la marche

Les Figures 3-7 à 3-10 montrent les variations d'énergie du centre de masse corporel (CM_c) et le travail mécanique externe (W_{ext}) réalisé au cours de la marche des patients. La perturbation principale des patients est une augmentation du W_{ext} .

3.4.1 Tracés types des variations temporelles d'énergie du centre de masse corporel

La Figure 3-7 présente les tracés types de l'évolution temporelle des variations d'énergie mécanique du CM_c lors d'un cycle de marche chez un patient hémiplégique, un patient atteint de gonarthrose, un patient ayant bénéficié d'une arthroplastie du genou, un patient amputé TT et un patient amputé TF. Les tracés des patients sont obtenus à des vitesses comparables.

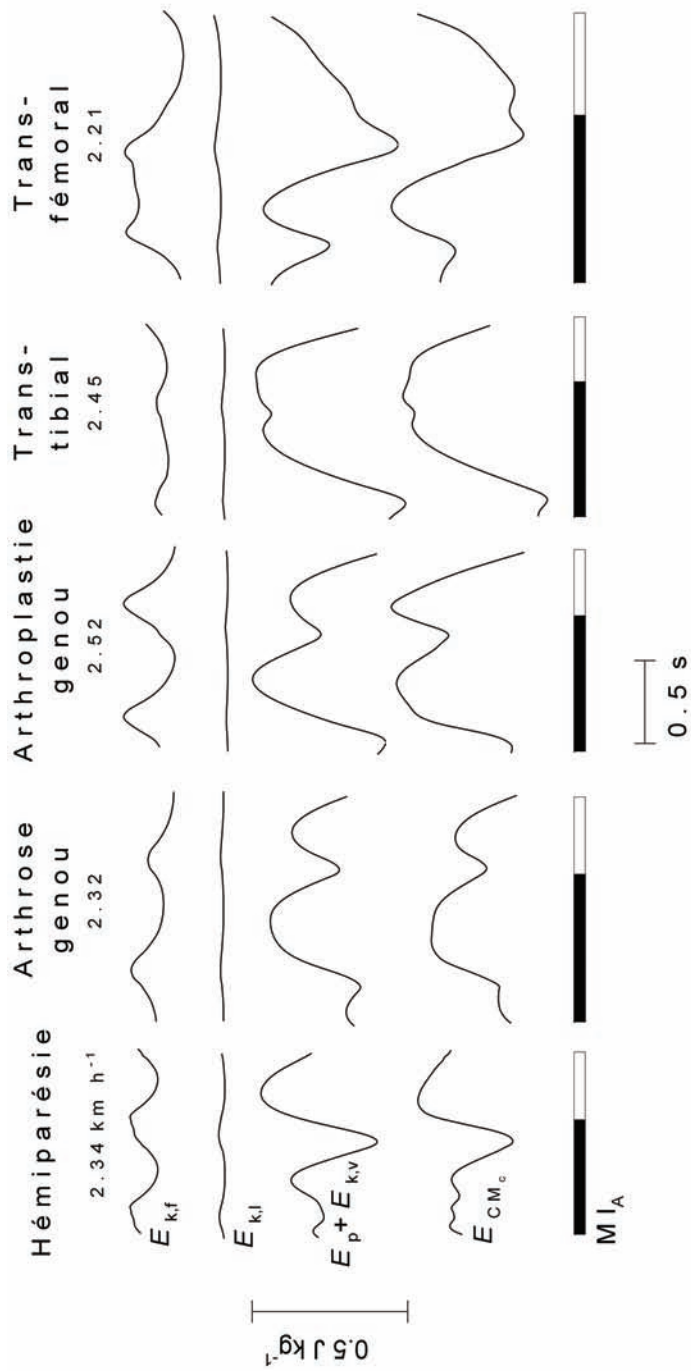


Figure 3-7

Tracés types de l'évolution temporelle des variations d'énergie mécanique du CM_c sur un cycle de marche. Les mesures sont réalisées sur les patients #6 (hémiparésie), #4 (arthrose genou), #5 (arthroplastie genou), #3 (trans-tibial) et #8 (trans-fémoral). $E_{k,l}$: variations d'énergie cinétique liées aux variations de vitesse antéro-postérieure du CM_c. $E_{k,f}$: variations d'énergie cinétique liées aux variations de vitesse latérale du CM_c. $E_p + E_{k,v}$: somme des variations d'énergie potentielle (E_p) et des variations d'énergie cinétique liées aux variations de vitesse verticale du CM_c ($E_{k,v}$). E_{CMc} : variations d'énergie totale du CM_c. MI_A : le rectangle plein correspond à l'appui au sol du membre inférieur atteint et le rectangle ouvert à la phase oscillante de ce membre. Un tracé type de l'évolution temporelle des variations d'énergie mécanique du CM_c chez un sujet sain est présenté à la Figure 2-2. Le début et la fin du cycle de marche correspondent au contact initial du pied du MI_A .

Quelque soit l'atteinte, il apparaît que les variations temporelles d'énergie mécanique totale du CM_c (E_{CM_c}) sont fortement perturbées. L'origine des perturbations des tracés E_{CM_c} provient principalement d'une altération de l'énergie liée aux mouvements verticaux CM_c (voir les tracés $E_p+E_{k,v}$). Contrairement aux tracés $E_p+E_{k,v}$, les tracés $E_{k,f}$ (énergie cinétique du CM_c en direction antéro-postérieure) sont moins perturbés par rapport à la normale. Ces tracés montrent que le CM_c est successivement accéléré et décéléré au cours d'un cycle de marche et que le minimum de v_f (vitesse du CM_c en direction antéro-postérieure) est atteint pendant les phases de simple appui alors que le maximum de v_f survient pendant les phases de double appui. Malgré les perturbations majeures des tracés $E_p+E_{k,v}$, ces derniers sont partiellement en opposition de phase avec les tracés $E_{k,f}$, permettant des transferts entre les énergies cinétique et potentielle du CM_c et réduisant *in fine* les variations d'énergie du tracé E_{CM_c} (énergie totale du CM_c) et donc le travail mécanique nécessaire pour mouvoir le CM_c (W_{ext}).

3.4.2 Augmentation du travail mécanique externe

La Figure 3-8 présente les résultats du W_{ext} réalisé au cours de la marche des patients ainsi que ses composantes verticale (W_v), antéro-postérieure (W_f) et latérale (W_l) en fonction de la vitesse de marche.

Les valeurs du W_{ext} sont supérieures à la normale chez de nombreux patients (Figure 3-8). Les normes présentées à la Figure 3-8 sont obtenues chez 8 sujets sains des deux sexes et âgés entre 23 et 34 ans, à qui l'on a demandé de marcher en série sur deux plate-formes de forces de 1.2 m de long et de 0.6 m de large, à différentes vitesses

comprises entre 0.25 et 1.75 m s^{-1} (0.9 et 6.3 km h^{-1} ; Tesio *et al.*, 1998b). Les méthodologies utilisées pour obtenir ces normes sont tout à fait similaires à celles de notre étude.

L'augmentation du W_{ext} réalisé par les patients est liée à l'augmentation du W_v et du W_l . W_f n'est pas affecté. L'augmentation du W_{ext} semble dépendre fortement de la vitesse de marche adoptée par les patients hémiparétiques. En effet, chez ces patients, l'augmentation du W_{ext} est moindre quand la vitesse de marche est plus importante. Par contre, dans les autres déficits, la relation entre W_{ext} et la vitesse n'est pas aussi marquée.

Le travail mécanique externe est de $0.45 \pm 0.1 \text{ J kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ chez les patients hémiparétiques, $0.48 \pm 0.2 \text{ J kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ chez les patients atteints de gonarthrose, $0.39 \pm 0.1 \text{ J kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ chez les patients ayant bénéficié d'une arthroplastie du genou, $0.53 \pm 0.2 \text{ J kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ chez les patients amputés TT et $0.54 \pm 0.1 \text{ J kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ chez les amputés TF. Suite à l'arthroplastie du genou, aucune différence significative n'est observée concernant W_{ext} . Néanmoins, la valeur moyenne du W_{ext} des patients diminue en postopératoire. Ceci peut s'expliquer par l'amélioration du mécanisme pendulaire liée à l'augmentation de la vitesse suite à l'arthroplastie du genou (voir section suivante 3.4.3).

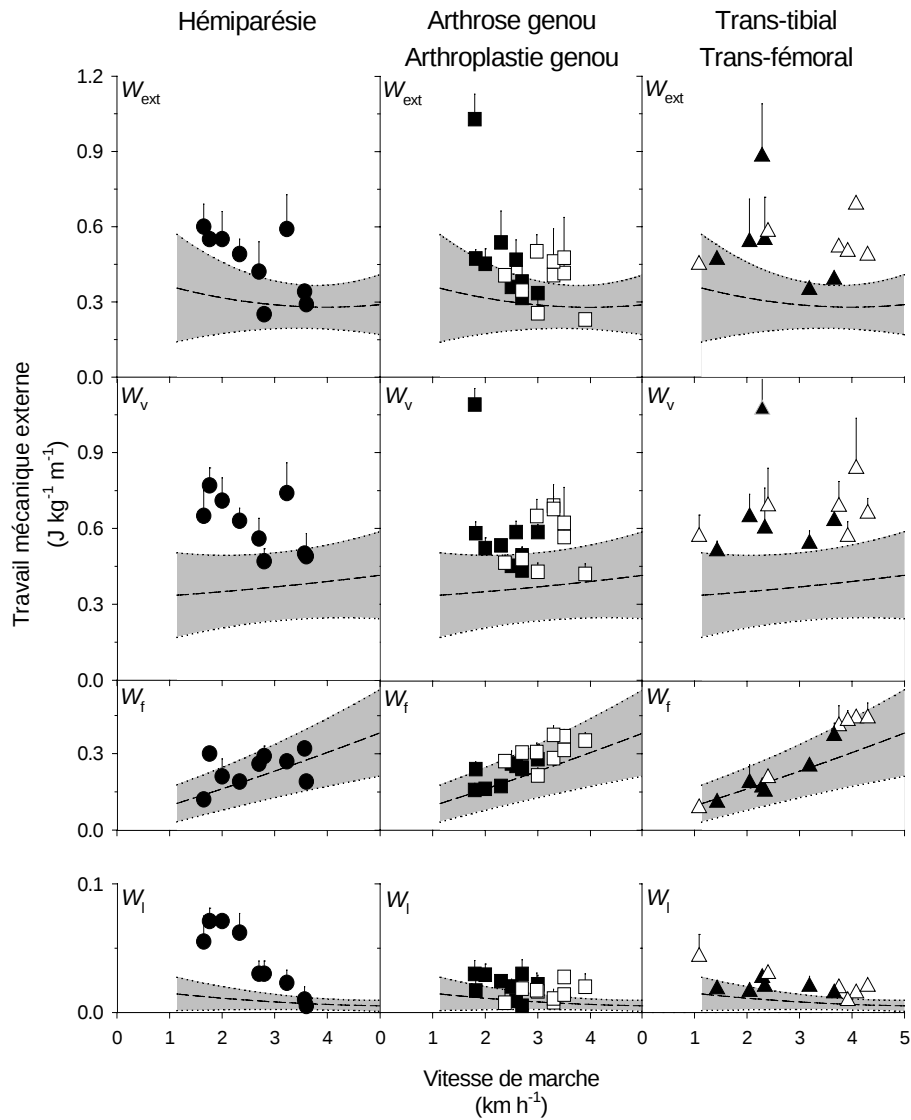


Figure 3-8

Travail mécanique externe réalisé au cours de la marche des patients en fonction de la vitesse de marche. Chaque symbole représente la valeur moyenne obtenue chez un patient. Les barres représentent les écarts-type lorsqu'ils dépassent la taille des symboles. Arthrose genou et arthroplastie genou : les carrés pleins représentent les patients atteints d'arthrose du genou et les carrés ouverts les mêmes patients ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou. Trans-tibial et trans-fémoral : les triangles pleins représentent les patients amputés trans-tibiaux et les triangles ouverts les amputés trans-fémoraux. W_{ext} : travail mécanique externe, W_v : travail mécanique vertical, W_f : travail mécanique antéro-postérieur, W_l : travail mécanique latéral. Les lignes interrompues représentent les ajustements de fonctions polynomiales du second degré sur des valeurs moyennes obtenues chez des sujets sains et les lignes pointillées représentent les ajustements de mêmes fonctions sur ces valeurs moyennes ± 2 écarts-type (Tesio *et al.*, 1998b). L'échelle de l'ordonnée pour W_l est différente des autres échelles.

3.4.3 Préservation du mécanisme pendulaire

La Figure 3-9 présente les résultats du W_{ext} des patients, la récupération d'énergie mécanique du CM_c et le ratio entre le travail mécanique en direction verticale (W_v) et le travail mécanique en direction antéro-postérieure (W_f) en fonction de la vitesse de marche. Les normes présentées à la Figure 3-9 sont celles obtenues par Tesio *et al.* (1998b).

La transformation d'énergie potentielle du CM_c en énergie cinétique (R) est très variable selon les patients (Figure 3-9). Dans l'ensemble, les valeurs de R sont normales. La transformation d'énergie mécanique du CM_c est de 50 ± 11 % chez les patients hémiparétiques, 43 ± 13 % chez les patients atteints de gonarthrose, 56 ± 7 % chez les patients ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou, 41 ± 15 % chez les patients amputés TT et 47 ± 8 % chez les amputés TF.

Quelque soit la vitesse, $W_v W_f^{-1}$ montre une augmentation du W_v pour un W_f donné.

Suite à l'arthroplastie du genou, aucune différence significative n'est observée concernant la récupération d'énergie mécanique du CM_c . Néanmoins, comme mentionné précédemment, le mécanisme pendulaire de la marche est fréquemment amélioré en postopératoire suite à l'augmentation de la vitesse. La Figure 3-10 illustre l'évolution temporelle des variations d'énergie mécanique du CM_c en pré et postopératoire suite à une arthroplastie. En préopératoire, le tracé $E_p + E_{k,v}$ est clairement perturbé. Le CM_c est excessivement élevé durant la phase d'appui sur le MI_A . Peu d'échanges d'énergie cinétique et potentielle du CM_c sont possibles au cours de cette phase,

résultant en une augmentation majeure de E_{CM_c} . Au contraire, en postopératoire, une normalisation du tracé $E_p + E_{k,v}$ est observée. Des échanges d'énergie cinétique et potentielle sont possibles et les variations de E_{CM_c} sont réduites.

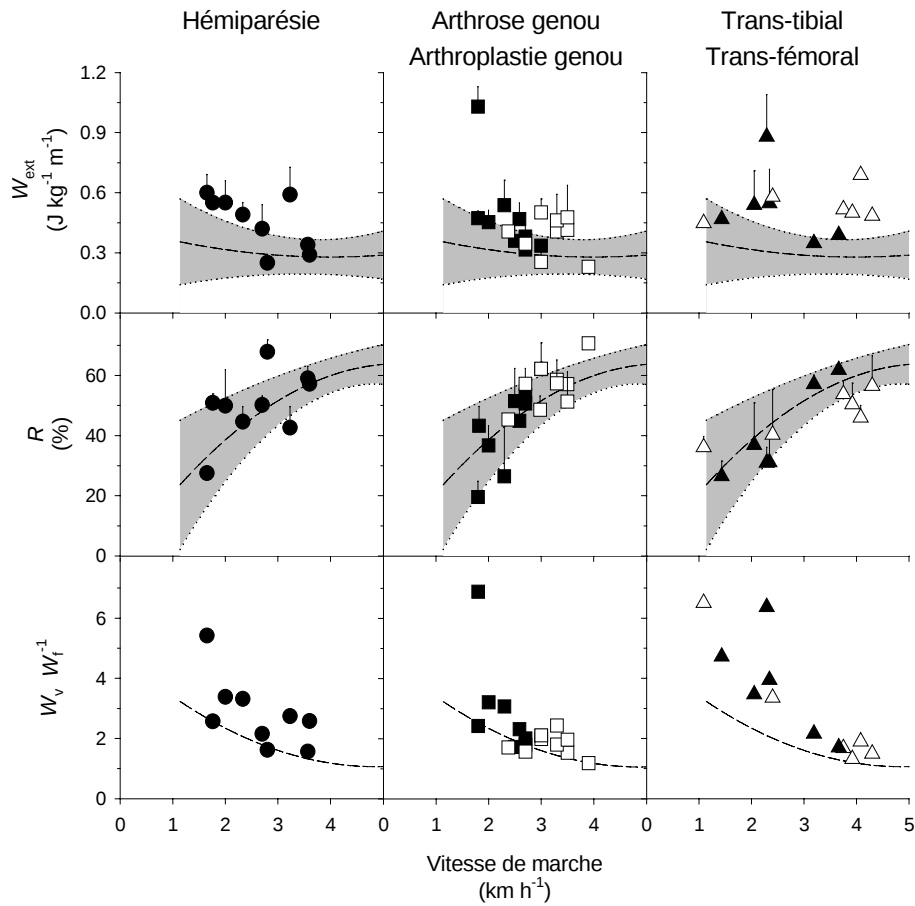


Figure 3-9

Travail mécanique externe réalisé au cours de la marche des patients (haut), récupération d'énergie mécanique du CM_c (milieu) et ratio entre le travail mécanique vertical et antéro-postérieur (bas) en fonction de la vitesse de marche. Chaque symbole représente la valeur moyenne obtenue chez un patient. Les barres représentent les écarts-type lorsqu'ils dépassent la taille des symboles. Arthrose genou et arthroplastie genou : les carrés pleins représentent les patients atteints d'arthrose du genou et les carrés ouverts les mêmes patients ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou. Trans-tibial et trans-fémoral : les triangles pleins représentent les patients amputés trans-tibiaux et les triangles ouverts les amputés trans-fémoraux. Les lignes interrompues représentent les ajustements de fonctions polynomiales du second degré sur des valeurs moyennes obtenues chez des sujets sains et les lignes pointillées représentent les ajustements de mêmes fonctions sur ces valeurs moyennes ± 2 écarts-type (Tesio *et al.*, 1998b).

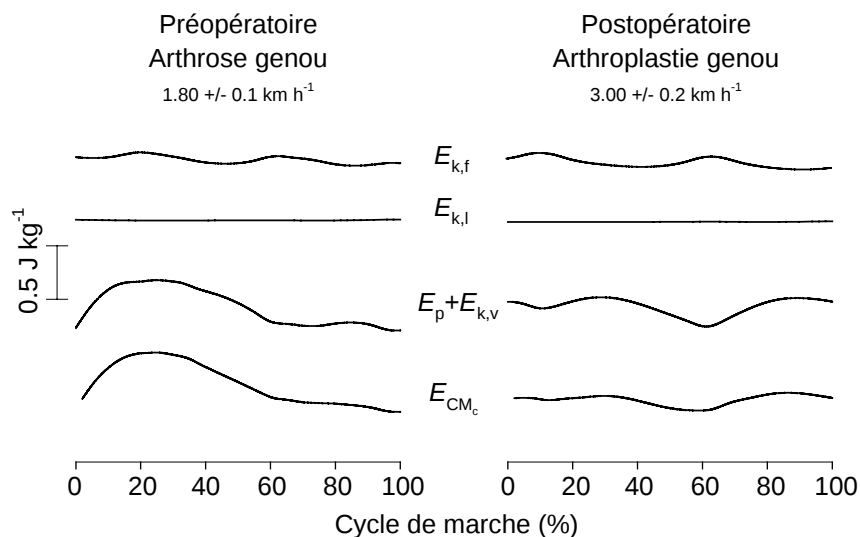


Figure 3-10

Evolution temporelle des variations d'énergie mécanique du CM_c chez un patient atteint d'arthrose du genou et ayant bénéficié d'une arthroplastie du genou. Les mesures sont réalisées sur le patient #1. Les tracés représentent la moyenne de 5 cycles de marche. Zéro et 100% du cycle de marche correspondent au contact initial du pied du MI_A .

3.5 Travail mécanique interne

Les Figures 3-11 et 3-12 montrent les variations d'énergie des segments corporels et le travail mécanique interne (W_{int}) réalisé au cours de la marche des patients. La perturbation principale des patients est une augmentation du W_{int} .

3.5.1 Tracés types des variations temporelles d'énergie des segments corporels

La Figure 3-11 présente les tracés types de l'évolution temporelle des variations d'énergie mécanique des segments corporels par rapport au CM_c lors d'un cycle de marche chez un patient hémiparétique, un patient atteint de gonarthrose, un patient ayant bénéficié d'une arthroplastie du genou, un patient amputé TT et un

patient amputé TF. Les tracés des patients sont obtenus à des vitesses comparables. Quelque soit l'atteinte, le travail mécanique interne réalisé pour mouvoir le segment TBT est moindre que celui réalisé pour mouvoir les MI_A et MI_{NA} . Néanmoins, il n'est pas négligeable et est surtout marqué chez les patients hémiparétiques et amputés TF. Chez ces mêmes patients, le travail mécanique interne réalisé pour mouvoir les membres inférieurs est asymétrique et principalement réalisé pour mouvoir le MI_{NA} durant la phase oscillante afin de le déplacer de derrière vers devant le CM_c .

3.5.2 Augmentation du travail mécanique interne

La Figure 3-12 présente W_{int} et le travail mécanique interne réalisé pour mouvoir les MI_A et MI_{NA} en fonction de la vitesse de marche. Chez de nombreux patients hémiparétiques et la quasi totalité des patients atteints de gonarthrose et ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou, les valeurs du W_{int} sont supérieures à la normale. Au contraire, la majorité des patients amputés ont des valeurs normales (Figure 3-12). Les normes présentées à la Figure 3-12 sont obtenues chez 5 sujets sains de sexe masculin et âgés entre 28 et 57 ans, à qui l'on a demandé de marcher sur dix plate-formes de forces, montées en série et mesurant au total 6 m de long et de 0.4 m de large, à différentes vitesses comprises entre 1 et 10 km h⁻¹ (Willems *et al.*, 1995). De plus, le déplacement des segments corporels sont capturés par un système de caméras utilisant des marqueurs actifs infra-rouges. Les méthodologies utilisées pour obtenir ces normes sont quasi similaires à celles de cette étude (voir 4.7.2.2).

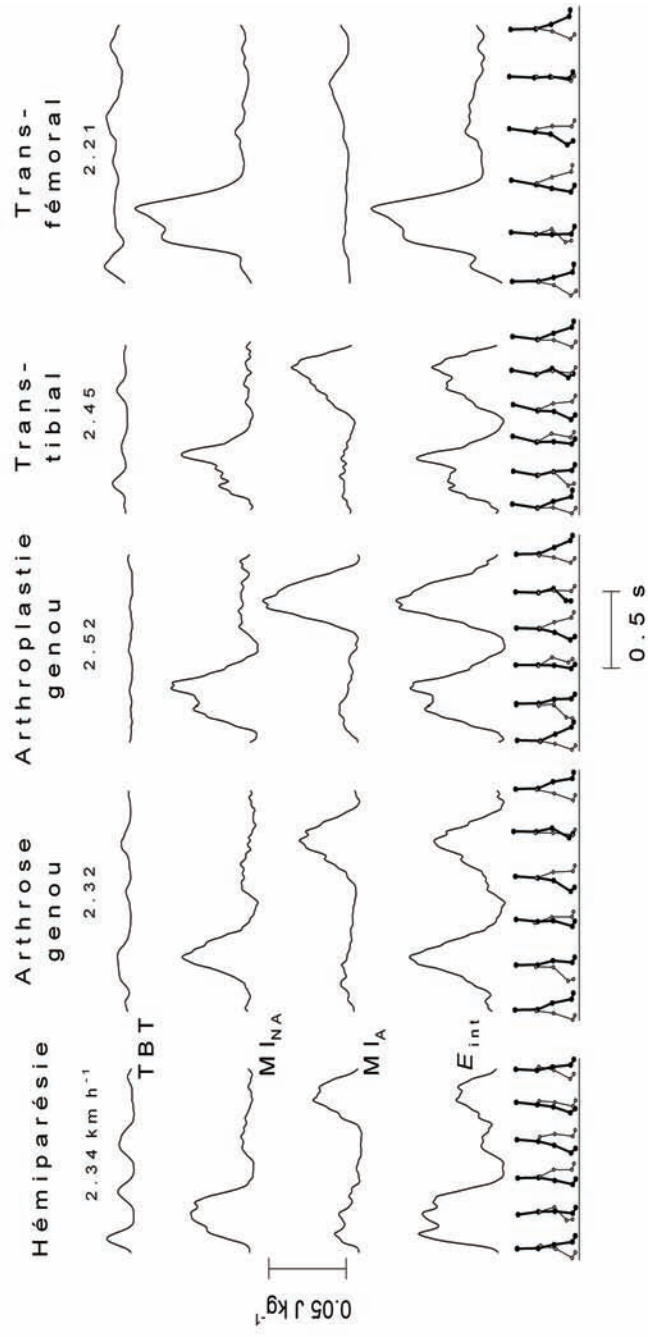


Figure 3-11
Tracés types de l'évolution temporelle des variations d'énergie mécanique des segments corporels sur un cycle de marche. Les mesures sont réalisées sur les patients #6 (hémiplésie), #4 (arthrose genou), #5 (arthroplastie genou), #3 (trans-tibial) et #8 (trans-fémoral). Les tracés représentent un cycle de marche. TBT : variations d'énergie cinétique du segment tête-bras-tronc liées à ses mouvements par rapport au CM_c. M_{NA} : variations d'énergie cinétique du membre inférieur non atteint liées à ses mouvements par rapport au CM_c. M_{IA} : variations d'énergie cinétique du membre inférieur atteint liées à ses mouvements par rapport au CM_c. E_{int} : variations d'énergie totale des segments corporels liées à leurs mouvements par rapport au CM_c. Le diagramme en bâtons représente la position des segments corporels tous les 20% du cycle de marche. Les lignes épaisses avec les cercles pleins concernent le membre inférieur atteint. Les lignes fines avec les cercles ouverts concernent le membre inférieur non atteint. Un tracé type de l'évolution temporelle des variations d'énergie mécanique des segments corporels chez un sujet sain est présenté à la Figure 2-2. Le début et la fin du cycle de marche correspondent au contact initial du pied du M_{IA}.

Le travail mécanique interne est de $0.29 \pm 0.04 \text{ J kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ chez les patients hémiparétiques, $0.39 \pm 0.1 \text{ J kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ chez les patients atteints de gonarthrose, $0.37 \pm 0.1 \text{ J kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ chez les patients ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou, $0.27 \pm 0.07 \text{ J kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ chez les patients amputés TT et $0.24 \pm 0.04 \text{ J kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ chez les amputés TF. En ce qui concerne les valeurs du W_{int} , il existe une différence hautement significative entre les groupes de patients (ANOVA à 1 critère ; $dl = 3$, $F = 6.143$, $p = 0.002$). Les patients amputés réalisent moins de W_{int} que les patients atteints de gonarthrose (Tukey ; $p = 0.004$) et que ces mêmes patients après une arthroplastie totale du genou (Tukey ; $p = 0.014$). En tenant compte du W_{int} pour mouvoir chaque membre inférieur, il existe une différence hautement significative entre les groupes de patients (Kruskal-Wallis ANOVA à 1 critère sur les rangs ; $dl = 7$, $H = 40.859$, $p < 0.001$). Par rapport aux patients atteints de gonarthrose (Dunn ; $p < 0.05$) et à ces mêmes patients après une arthroplastie totale du genou (Dunn ; $p < 0.05$), les amputés réalisent moins de W_{int} pour mouvoir le MI_A que le MI_{NA} . Finalement, les patients hémiparétiques (t pairé ; $dl = 8$, $t = -2.839$, $p = 0.022$), les patients amputés TT (t pairé ; $dl = 8$, $t = -6.606$, $p = 0.001$) et les amputés TF (t pairé ; $dl = 8$, $t = -5.540$, $p = 0.003$) réalisent significativement moins de travail mécanique pour mouvoir le MI_A que le MI_{NA} . Le Tableau 3-5 présente les résultats moyens du W_{int} réalisé pour mouvoir le MI_A et le MI_{NA} en fonction des différents déficits.

Résultats

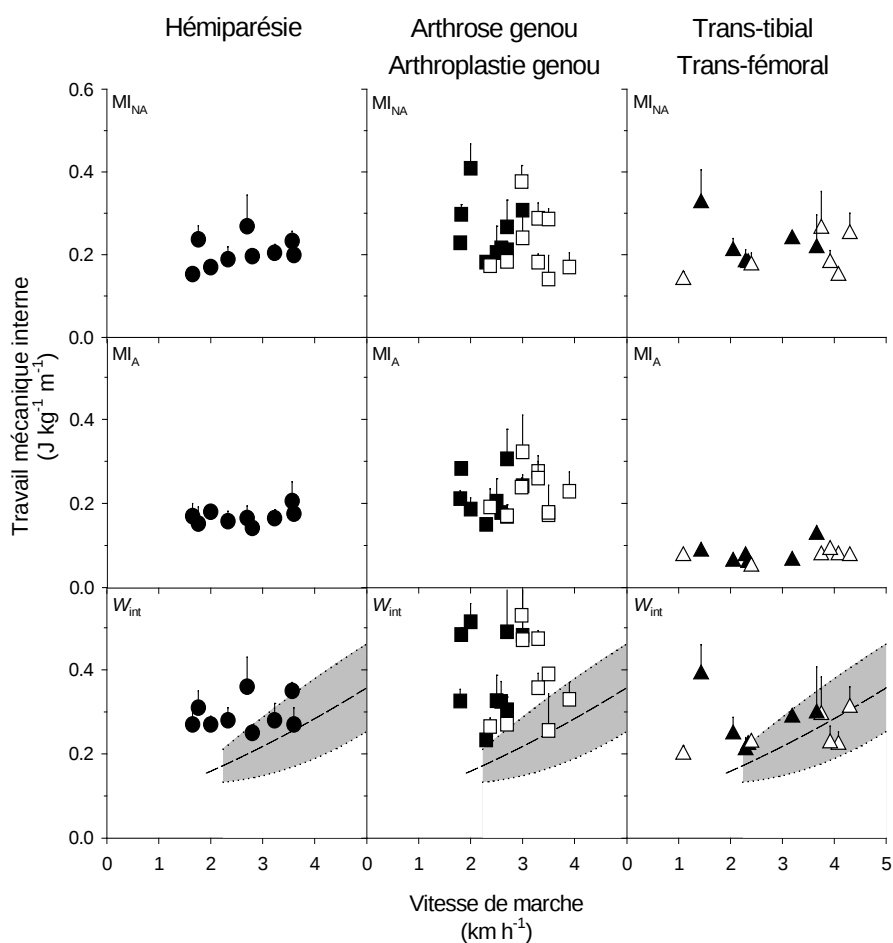


Figure 3-12

Travail mécanique interne réalisé au cours de la marche des patients en fonction de la vitesse de marche. Chaque symbole représente la valeur moyenne obtenue chez un patient. Les barres représentent les écarts-type lorsqu'ils dépassent la taille des symboles. Arthrose genou et arthroplastie genou : les carrés pleins représentent les patients atteints d'arthrose du genou et les carrés ouverts les mêmes patients ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou. Trans-tibial et trans-fémoral : les triangles pleins représentent les patients amputés trans-tibiaux et les triangles ouverts les amputés trans-fémoraux. MI_A : travail mécanique réalisé pour mouvoir le membre inférieur atteint. MI_{NA} : travail mécanique réalisé pour mouvoir le membre inférieur non atteint. W_{int} : travail mécanique réalisé pour mouvoir le segment tête-bras-tronc et les membres inférieurs. Les lignes interrompues représentent les ajustements d'une fonction polynomiale du second degré sur des valeurs moyennes obtenues chez des sujets sains et les lignes pointillées représentent les ajustements d'une même fonction sur ces valeurs moyennes ± 2 écarts-type (Willems *et al.*, 1995).

Tableau 3-5 : W_{int} réalisé pour mouvoir le MI_A et le MI_{NA} en fonction des déficits

	MI_A ($\bar{X} \pm s$)	MI_{NA} ($\bar{X} \pm s$)
Hémiplégie	0.17 ± 0.02	0.20 ± 0.03
Arthrose genou	0.21 ± 0.03	0.26 ± 0.07
Arthroplastie genou	0.23 ± 0.05	0.23 ± 0.07
Amputation TT	0.08 ± 0.02	0.22 ± 0.05
Amputation TF	0.07 ± 0.01	0.19 ± 0.05

MI_A : membre inférieur atteint, MI_{NA} : membre inférieur non atteint, $\bar{X}$: moyenne, s : écart-type, TT: trans-tibial, TF: trans-fémoral

Suite à l'arthroplastie du genou, aucune différence significative n'est observée concernant W_{int} . Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de la vitesse de marche en postopératoire. En effet, même si W_{int} diminue en postopératoire, ce dernier augmente avec la vitesse de marche. La Figure 3-13 illustre l'effet de la vitesse sur les variations temporelles d'énergie des segments corporels en pré et postopératoire d'une arthroplastie. L'augmentation du W_{int} semble être indépendante de la vitesse de marche adoptée par les patients (Figure 3-12).

3.6 Travail mécanique total

Les Figures 3-14 et 3-15 montrent les variations d'énergie du CM_c , des segments corporels et du corps entier et le travail mécanique total (W_{tot}) de la marche des patients. La perturbation principale des patients est une augmentation du W_{tot} .

Résultats

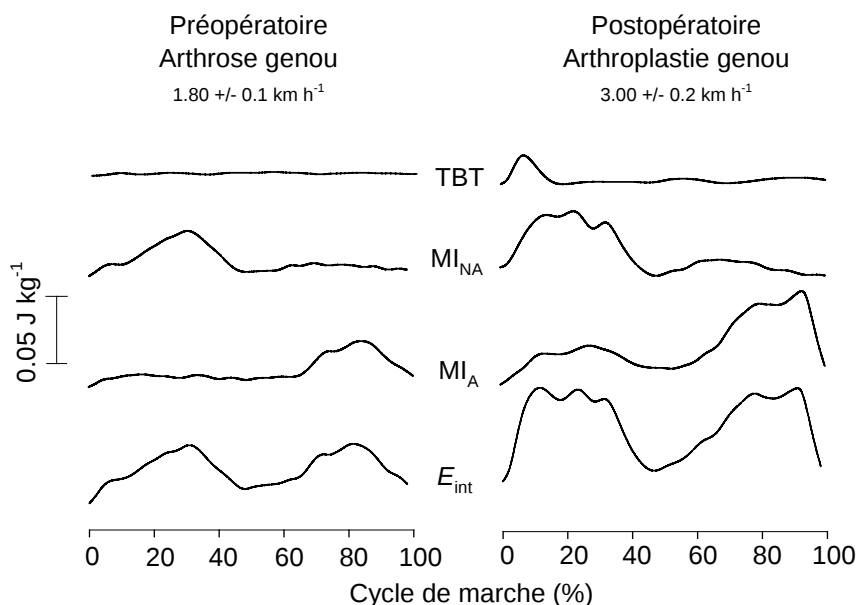


Figure 3-13

Evolution temporelle des variations d'énergie mécanique des segments corporels chez un patient atteint d'arthrose du genou et ayant bénéficié d'une arthroplastie du genou. Les mesures sont réalisées sur le patient #1. Les tracés représentent la moyenne de 5 cycles de marche. TBT : variations d'énergie cinétique du segment tête-bras-tronc liées à ses mouvements par rapport au CM_c. MI_{NA} : variations d'énergie cinétique du membre inférieur non atteint liées à ses mouvements par rapport au CM_c. MI_A : variations d'énergie cinétique du membre inférieur atteint liées à ses mouvements par rapport au CM_c. E_{int} : variations d'énergie totale des segments corporels liées à leurs mouvements par rapport au CM_c. Zéro et 100% du cycle de marche correspondent au contact initial du pied du MI_A.

3.6.1 Tracés types des variations temporelles d'énergie du corps entier

La Figure 3-14 présente les tracés types de l'évolution temporelle des variations d'énergie mécanique du CM_c, des segments corporels et du corps entier lors d'un cycle de marche chez un patient hémiparétique, un patient atteint de gonarthrose, un patient ayant bénéficié d'une arthroplastie du genou, un patient amputé TT et un patient amputé TF. Les tracés des patients sont obtenus à des vitesses comparables. Il apparaît clairement que les variations d'énergie mécanique du corps entier, E_{tot}, sont essentiellement influencées par

les variations d'énergie mécanique du CM_c (E_{CM_c}). En effet, aux basses vitesses de marche adoptées par les patients, les variations d'énergie mécanique des segments corporels sont faibles (E_{int}).

3.6.2 Augmentation du travail mécanique total

Le travail mécanique total (W_{tot}) réalisé au cours de la marche des patients en fonction de la vitesse ainsi que le ratio entre ce dernier et la norme ($W_{tot N}$) sont présentés à la Figure 3-15. En fonction de la vitesse de marche, W_{tot} de la marche de presque tous les patients est supérieur à la norme. Seulement 3 patients (2 patients hémiparétiques et 1 patient ayant bénéficié d'une arthroplastie du genou) ont des valeurs normales (Figure 3-15). Les normes présentées à la Figure 3-15 sont celles obtenues par Willems *et al.* (1995).

De manière générale, l'augmentation du W_{tot} semble dépendre de la vitesse de marche. En effet, quelque soit l'atteinte, l'augmentation du $W_{tot} W_{tot N}^{-1}$ est moindre quand la vitesse de marche est plus importante. Les valeurs moyennes de W_{tot} et son augmentation par rapport à $W_{tot N}$ en fonction des différents déficits sont présentées dans le Tableau 3-6. Le travail mécanique total moyen le plus bas est observé chez les patients hémiparétiques et le plus haut chez les patients atteints de gonarthrose. Ces augmentations du W_{tot} moyen correspondent respectivement à environ 1.5 et 1.9 fois la normale.

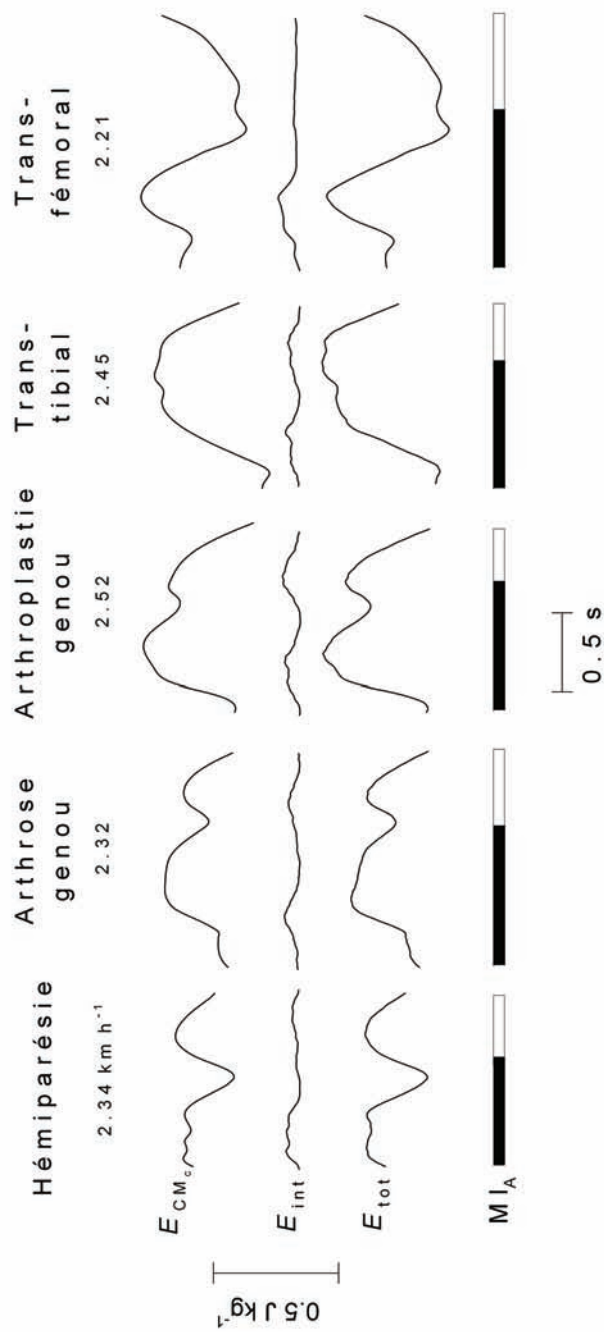


Figure 3-14
Tracés types de l'évolution temporelle des variations d'énergie mécanique du CM_c , des segments corporels et du corps entier sur un cycle de marche. Les tracés représentent un cycle de marche. E_{CMc} : variations d'énergie totale du CM_c . E_{cm} : variations d'énergie totale des segments corporels liés à leurs mouvements par rapport au CM_c . E_{int} : somme de E_{CMc} et de E_{cm} , correspondant aux variations d'énergie du corps entier. MI_A : le rectangle plein correspond à l'appui au sol du membre inférieur atteint et le rectangle ouvert à la phase oscillante de ce membre. Les tracés E_{CMc} et E_{int} sont similaires à ceux présentés respectivement dans les Figures 3-7 et 3-11. Le début et la fin du cycle de marche correspondent au contact initial du pied du MI_A .

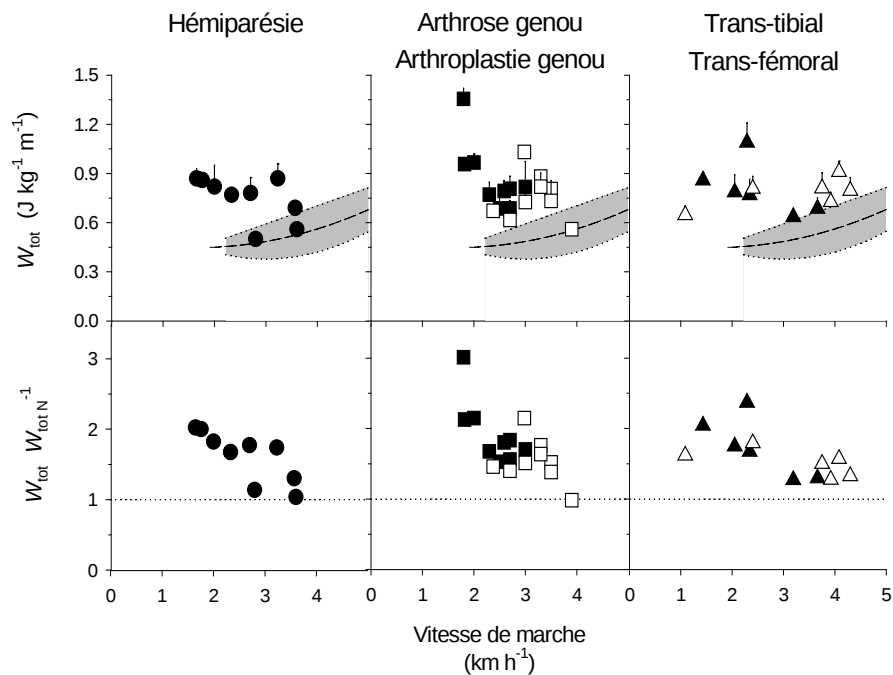


Figure 3-15

Travail mécanique total au cours de la marche des patients (haut) et ratio entre le travail mécanique total et la normale (bas) en fonction de la vitesse de marche. Chaque symbole représente la valeur moyenne obtenue chez un patient. Les barres représentent les écarts-type lorsqu'ils dépassent la taille des symboles. Arthrose genou et arthroplastie genou : les carrés pleins représentent les patients atteints d'arthrose du genou et les carrés ouverts les mêmes patients ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou. Trans-tibial et trans-fémoral : les triangles pleins représentent les patients amputés trans-tibiaux et les triangles ouverts les amputés trans-fémoraux. Dans les graphiques du haut, les lignes interrompues représentent les ajustements d'une fonction polynomiale du second degré sur des valeurs moyennes obtenues chez des sujets sains et les lignes pointillées représentent les ajustements d'une même fonction sur ces valeurs moyennes ± 2 écarts-type (Willems *et al.*, 1995).

Tableau 3-6 : Travail mécanique total et son augmentation par rapport à la norme en fonction des déficits

	$W_{\text{tot}} \text{ (J kg}^{-1} \text{ m}^{-1}\text{)}$ $(\bar{X} \pm s)$	$W_{\text{tot}} / W_{\text{tot N}}^{-1}$ $(\bar{X} \pm s)$
Hémiplégie	0.75 ± 0.1	1.61 ± 0.4
Arthrose genou	0.87 ± 0.2	1.93 ± 0.5
Arthroplastie genou	0.76 ± 0.1	1.53 ± 0.3
Amputation TT	0.80 ± 0.2	1.73 ± 0.4
Amputation TF	0.78 ± 0.1	1.51 ± 0.2

$\bar{X}$: moyenne, s : écart-type, TT: trans-tibial, TF: trans-fémoral

3.7 Puissance mécanique

La Figure 3-16 montre la puissance mécanique totale moyenne (P_{tot}) de la marche des patients ainsi que ses composantes externe (P_{ext}) et interne (P_{int}), en fonction de la vitesse de marche. La perturbation principale des patients est une augmentation de P_{tot} (Figure 3-16). Les normes présentées à la Figure 3-16 sont celles obtenues par Willems *et al.* (1995).

L'augmentation de P_{tot} réalisée par les patients est liée : à une augmentation de P_{ext} et de P_{int} chez les patients hémiparétiques, essentiellement à une augmentation de P_{int} chez les patients atteints de gonarthrose et ayant bénéficié d'une arthroplastie du genou, et essentiellement à une augmentation de P_{ext} chez les patients amputés (voir $P_{\text{ext}} P_{\text{int}}^{-1}$, Figure 3-16).

3.8 Rendement de la production du travail mécanique positif

La Figure 3-17 présente le coût énergétique (C), le travail mécanique total (W_{tot}) et le rendement de la production du travail mécanique positif (η_{w^+}) des patients en fonction de la vitesse de marche. Les normes présentées à la Figure 3-17 sont celles obtenues par DeJaerger *et al.* (2001) et Willems *et al.* (1995).

Le rendement de la production du travail mécanique positif est de $20.5 \pm 3\%$ chez les patients hémiparétiques, $17.7 \pm 5\%$ chez les patients atteints de gonarthrose, $20.1 \pm 9\%$ chez les patients ayant bénéficié d'une arthroplastie du genou, $21.2 \pm 8\%$ chez les patients amputés TT et $19.6 \pm 7\%$ chez les amputés TF.

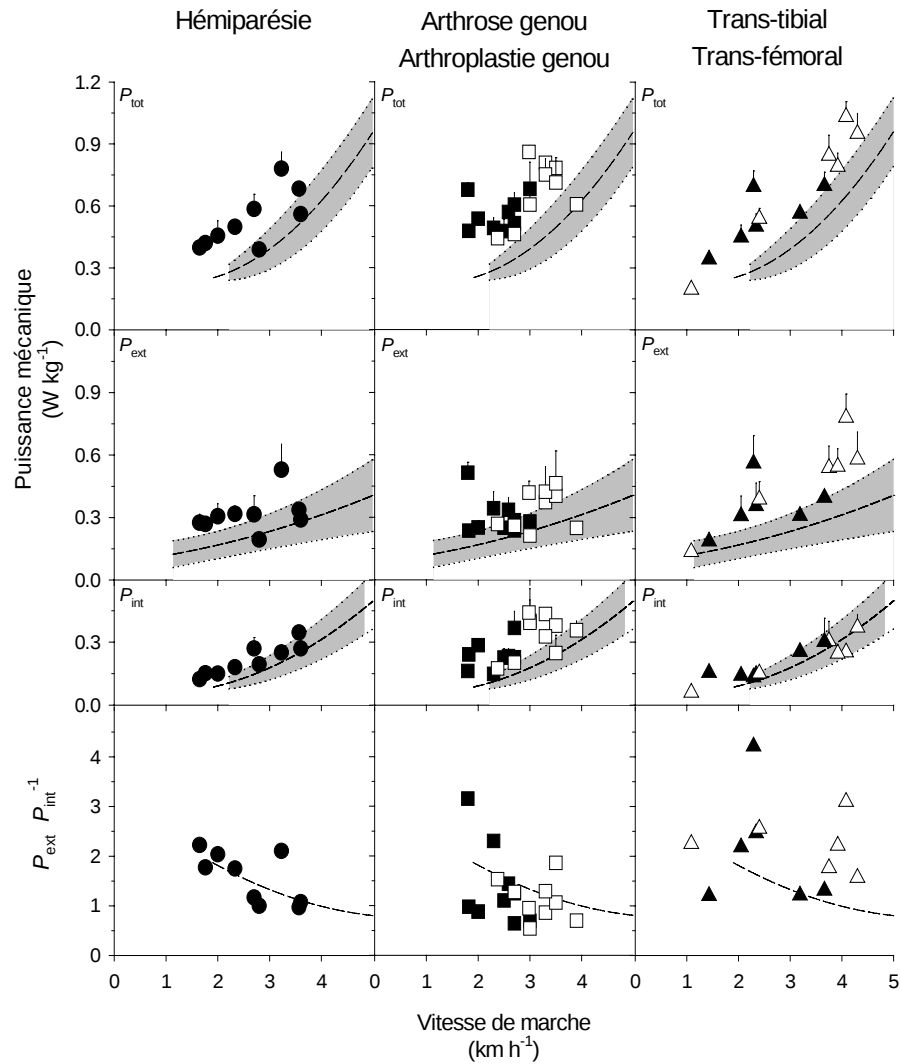


Figure 3-16

Puissance mécanique totale de la marche des patients (haut), puissance mécanique externe (milieu), puissance mécanique interne (milieu) et rapport entre la puissance mécanique externe et interne (bas) en fonction de la vitesse de marche. Chaque symbole représente la valeur moyenne obtenue chez un patient. Les barres représentent les écarts-type lorsqu'ils dépassent la taille des symboles. Arthrose genou et arthroplastie genou : les carrés pleins représentent les patients atteints d'arthrose du genou et les carrés ouverts les mêmes patients ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou. Trans-tibial et trans-fémoral : les triangles pleins représentent les patients amputés trans-tibiaux et les triangles ouverts les amputés trans-fémoraux. P_{tot} : puissance mécanique totale, P_{ext} : puissance mécanique externe, P_{int} : puissance mécanique interne. Les lignes interrompues représentent les ajustements de fonctions polynomiales du second degré sur des valeurs obtenues chez des sujets sains (Willems *et al.*, 1995) et les lignes pointillées représentent les ajustements de mêmes fonctions sur ces valeurs moyennes ± 2 écarts-type.

Tous déficits confondus, C et W_{tot} des patients sont tous les deux augmentés en moyenne de 1.5 à 2 fois (voir sections 3.3.2 et 3.6.2). Quelque soit l'atteinte, les valeurs du η_{w^+} sont comprises entre 10 et 30%. Pour une même atteinte, les valeurs du η_{w^+} varient considérablement d'un patient à l'autre. La majorité des patients présentent des valeurs de η_{w^+} inférieures à 25% mais quelques patients présentaient des valeurs supérieures (1 patient atteint de gonarthrose, 3 patients ayant bénéficié d'une arthroplastie du genou, 3 patients TT et 2 patients TF).

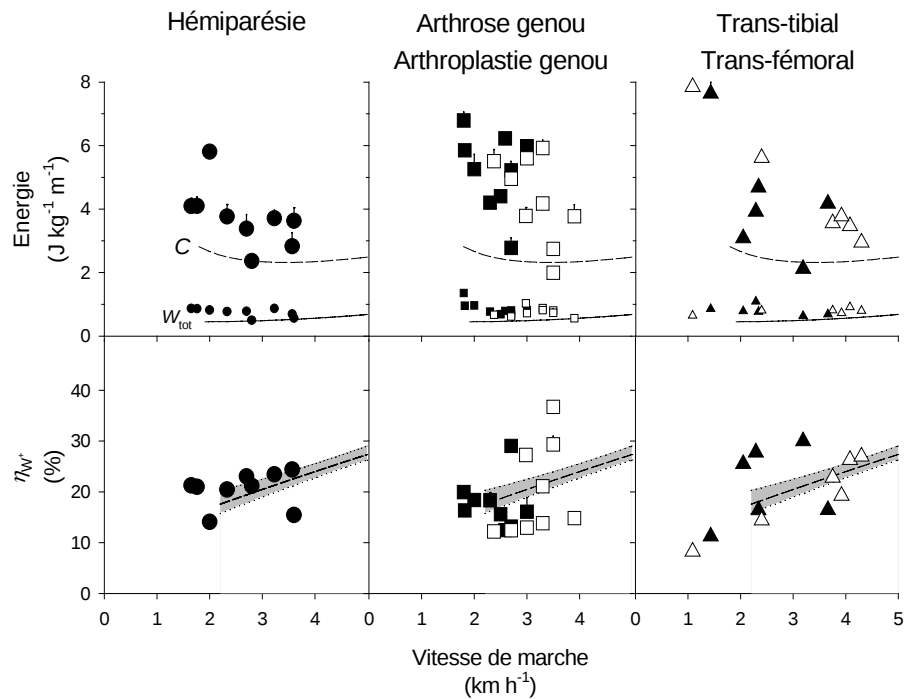


Figure 3-17

Travail mécanique total (haut), coût énergétique net (haut) et rendement de la production du travail mécanique positif (bas) en fonction de la vitesse de marche. Chaque symbole représente la valeur moyenne obtenue chez un patient. Les barres représentent les écarts-type lorsqu'ils dépassent la taille des symboles. Arthrose genou et arthroplastie genou : les carrés pleins représentent les patients atteints d'arthrose du genou et les carrés ouverts les mêmes patients ayant bénéficié d'une arthroplastie totale du genou. Trans-tibial et trans-fémoral : les triangles pleins représentent les patients amputés trans-tibiaux et les triangles ouverts les amputés trans-fémoraux. Dans les graphiques du haut, les grands symboles représentent le coût énergétique et les petits symboles le travail mécanique total. Dans les graphiques du bas, les lignes interrompues et les lignes pointillées représentent des ajustements de fonctions polynomiales du second degré sur les valeurs moyennes ± 2 écarts-type obtenues chez des sujets sains (Figures 3-6 et 3-15).