

Aspects physiologiques de la marche assistée

Ann. Kinésith., 1978, 5, 223-231

H. THYS *

Heureusement pour la kinésithérapie, les méthodes de mesure objectives deviennent de plus en plus fréquentes et fournissent des renseignements sur la pénibilité des efforts que nous demandons à nos patients. Il est intéressant de connaître le coût énergétique de la marche assistée, modalité de ré-entraînement que tous les kinésithérapeutes utilisent journalement, et les conclusions pratiques que tire l'auteur sont les bienvenues. On remarquera de toute manière que l'effort d'ambulation assisté par n'importe quel accessoire est de loin supérieur à celui de la marche normale du sujet sain. Peut-être n'est-il donc pas recommandable d'insister trop sur la reconquête d'un périmètre de marche paranormal? A chacun de tirer des conclusions maintenant qu'il est en possession des données utiles.

Résumé

La marche assistée entraîne des élévations de la consommation d'oxygène et de la fréquence cardiaque significativement plus importantes que dans la marche normale. L'augmentation de VO^2 la plus grande s'observe dans la marche avec tribune et la plus faible avec bâquilles allemandes. L'évolution de la fréquence cardiaque est encore plus marquée.

Des enregistrements électromyographiques révèlent une activité essentiellement tonique des muscles de l'avant-bras et l'activité phasique du triceps brachial et du grand pectoral, vraisemblablement responsables, pour une part importante, de l'augmentation du métabolisme et de la tachycardie.

En outre, ces modes de locomotion s'accompagnent de l'augmentation cyclique des pressions intrapulmonaire et abdominale. Les hyperpressions les plus fortes s'observent dans la marche à l'aide de la tribune et des bâquilles axillaires; les plus faibles avec bâquilles allemandes.

Ces données indiquent qu'il faut, dans la mesure du possible, préférer les bâquilles allemandes aux autres moyens d'assistance.

INTRODUCTION

La marche normale obéit à des lois physiques. Ses principes mécaniques n'ont été définis que récemment (1). Au cours de chaque pas,

* Maître de conférences, Laboratoire de Physiologie Humaine Appliquée, Institut Supérieur d'Éducation Physique, Université de Liège, Belgique.

Communication présentée le 23 septembre 1977 au 2^e Congrès de la Société de Biomécanique, Liège, Belgique.

le centre de gravité corporel s'élève et, simultanément, voit sa vitesse horizontale diminuer. En d'autres termes, les variations de l'énergie potentielle du corps évoluent en opposition de phase avec les variations de l'énergie cinétique. La transformation réciproque de ces deux formes d'énergie mécanique constitue une sorte de canon de la marche normale.

Dès lors, le recours à divers moyens d'assistance est susceptible de modifier le mécanisme normal de la marche.

Etant donné les rapports étroits qui, chez le vivant, lient les phénomènes mécaniques et physiologiques, nous avons abordé les altérations biomécaniques de la locomotion de façon indirecte. En l'occurrence, ce travail vise à mettre en lumière, dans quelle mesure, divers appareils destinés à permettre une certaine forme de déambulation à des handicapés ou à des convalescents, peuvent affecter certains paramètres physiologiques. Les aspects traités sont :

- a. Le métabolisme,
- b. Les variations de fréquence cardiaque,
- c. Certains aspects de la mécanique ventilatoire et
- d. La sollicitation de muscles non directement concernés dans la marche normale.

MÉTHODES

Vingt sujets sains, hommes et femmes, âgés de 20 à 25 ans et étudiants de Licence en Éducation Physique constituaient la population expérimentale. Leurs membres inférieurs étaient liés ensemble au moyen d'un bandage élastique. Ils devaient effectuer un parcours déterminé sur sol plat à une allure qu'ils choisissaient spontanément, en s'aider de 4 moyens d'assistance classiques : béquilles axillaires, béquilles allemandes (cannes canadiennes), tripodes et tribune.

La consommation d'oxygène, VO^2 , était mesurée à partir de l'air expiré recueilli dans des sacs de Douglas et analysée au terme d'une période de 20 minutes de repos qui suivait le parcours. La VO^2 en ml/kg/min, convertie en calories et divisée par la vitesse moyenne de progression représente le coût énergétique par kilo de poids corporel et par kilomètre de parcours (Kcal/kg/km).

Simultanément, la fréquence cardiaque était mesurée au cours de la phase de régime stable de l'exercice. L'accroissement de fréquence cardiaque était comparé à la fréquence cardiaque théorique prévisible d'après la puissance mécanique développée. En supposant que le rendement énergétique de la marche assistée est légèrement inférieur à celui de la marche normale (20,7 % selon Margaria) (6), on peut évaluer la puissance mécanique qui correspond à la VO^2 mesurée, à partir des données de Christensen (2). Selon Bonjer, à un accroissement de puissance de 10 watts, correspond une augmentation de fréquence cardiaque de 4,1 chez l'homme et de 5,3 chez la femme. La fréquence cardiaque théorique, FCth, est alors donnée par :

$$\text{FCth} = \text{FCr} + (a, \frac{w}{10})$$

où FCr est la fréquence cardiaque de repos,

a = 4,1 chez l'homme et 5,3 chez la femme,

w = la puissance développée au cours de l'exercice.

Dans une seconde série d'expériences portant sur un nombre de sujets plus restreint, les variations de la pression abdominale et de la pression thoracique ont été mesurées au moyen de sondes œsophagienne et gastrique reliées à un électromanomètre (Elema EMT 34) par un cathéter en polyéthylène. La liaison sonde-manomètre était réalisée par des tuyaux en polyvinyle permettant aux sujets des déplacements de 4 m.

L'activité de 4 groupes musculaires sollicités par les moyens d'assistance a été mise en évidence par électromyographie de surface. L'activité électrique intégrée de ces muscles était comparée à l'électromyogramme obtenu au cours d'une contraction isométrique maximale exécutée selon le testing musculaire de Kendall (4).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. Métabolisme

La fig. 1 donne les courbes représentant l'évolution du coût énergétique (en Kcal/Kg.Km) en fonction de la vitesse de progression. Chaque courbe se réfère à un type de marche différent.

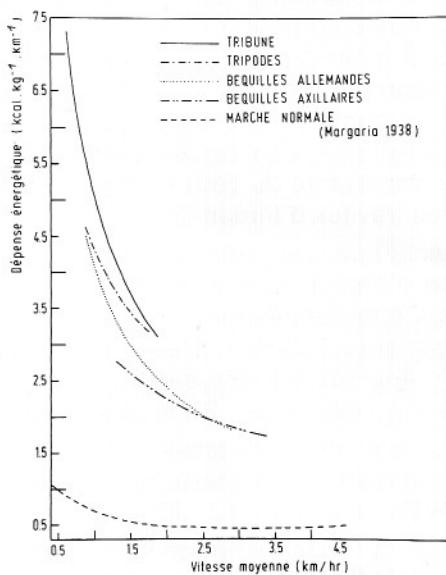


FIG. 1. - Coût énergétique en fonction de la vitesse de progression dans différents types de marche.

Pour la comparaison, la courbe du bas reprend les données de Margaria (5) relatives à la marche normale; les autres courbes se réfèrent à la marche avec béquilles axillaires, béquilles allemandes, tripodes et tribune.

On constate, en premier lieu, que pour tous les moyens d'assistance, la dépense énergétique par km parcouru est nettement supérieure au coût de la marche normale. Avec tribune, elle est augmentée de 4 ou 5 fois, ce qui est substantiel.

En second lieu, le coût énergétique de la marche assistée est très dépendant de la vitesse de progression, alors que dans la marche normale, il est pratiquement constant, pour des vitesses allant de 2 à 5 km/hr.

Dans la marche normale sur sol plat, la vitesse la plus économique est

d'environ 4 km/hr. A des valeurs de vitesse supérieures ou inférieures, la dépense d'énergie augmente (5). Avec des moyens d'assistance, il est remarquable que les sujets adoptent spontanément des vitesses de progression inférieures à 4 km/hr. Dès lors, la fréquence et la longueur des pas se trouvent modifiées :

- a. Par réduction de la vitesse;
- b. Par l'emploi des appareils.

Ces deux facteurs peuvent, en conséquence, contribuer à accroître la dépense d'énergie. Il faut y ajouter un troisième : à chaque pas de marche normale, le corps après s'être élevé se reçoit sur le sol par l'intermédiaire du membre inférieur qui s'est porté en avant. La décélération qui survient à cet instant est fortement amortie par la flexion du genou et de la hanche et par une action programmée de freinage des muscles antagonistes. Le pas peut se poursuivre sans effort appréciable pour les muscles extenseurs de la jambe arrière. Au contraire, dans la marche assistée, la décélération du corps se produit via un engin rigide; dès lors, le travail que les muscles propulseurs doivent accomplir s'en trouve accru et la dépense d'énergie augmente. La hausse importante du coût énergétique et son interprétation sont en accord avec les travaux d'Inman (3).

On peut estimer l'intensité relative de la marche assistée en rapportant la dépense d'énergie à la consommation maximum d'oxygène ($VO_2\text{MAX}$) des sujets. Cette donnée renseigne sur les capacités maximales d'adaptation de l'organisme à l'effort. Dans la marche avec bâquilles et tripodes, la dépense énergétique représente en moyenne 25 % de la $VO_2\text{MAX}$. Avec tribune, elle vaut 30 % pour les vitesses les plus économiques.

B. Fréquence cardiaque

Etant donné que la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque sont liées par une relation linéaire (7), on pouvait s'attendre à un accroissement substantiel du pouls/min, reflétant l'augmentation importante de la dépense énergétique. Toutefois, l'augmentation de FC peut être considérée comme normale si elle correspond à la puissance mécanique développée au cours de la marche assistée.

Les histogrammes de la *fig. 2* représentent l'accroissement de FC en sus de la fréquence cardiaque prédicta par la formule exposée en I. La valeur zéro de l'ordonnée est la fréquence cardiaque que l'on aurait dû observer, eu égard à la consommation d'oxygène et à la puissance mécanique développée.

Pour tous les moyens d'assistance, la FC observée est supérieure à sa valeur prédicta. L'« excès » d'augmentation en sus de cette valeur représente la surcharge cardio-vasculaire imputable aux différents moyens d'assistance. C'est pour la marche avec tribune que la surcharge est la plus importante; elle est statistiquement significative au seuil de $P < .001$. A l'opposé, la marche avec bâquilles axillaires chez les femmes et la marche

Augmentation de fréquence cardiaque

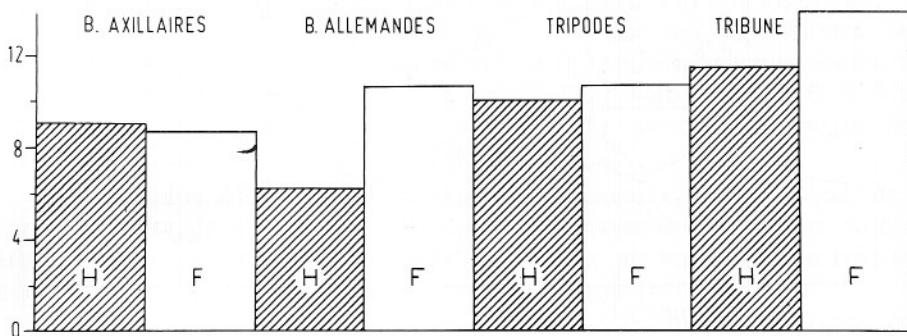


FIG. 2. - Augmentation de fréquence cardiaque, FC, en pulsations/min. en sus de la valeur prédictive à partir de la puissance mécanique développée dans 4 types de marche assistée chez les hommes (H) et chez les femmes (F).

avec béquilles allemandes chez les hommes n'entraînent qu'une surcharge non significative.

Au cours de l'exercice musculaire d'intensité maximale, la FC maximale observée se réduit de façon sensible avec l'âge. De 250/min vers 14 ans, elle passe à 210-200/min à 20 ans pour tomber à 175-165/min à 50 ans. Chez des individus jeunes et sains, une FC de 160/min correspondant à un effort d'intensité moyenne est fort bien tolérée. Par contre, certains handicapés supportent mal des exercices imposant des FC supérieures à 110-120/min (10). La moyenne des FC expérimentales atteintes dans la marche avec tribune (117,5/min \pm 19,9) correspond précisément à cette valeur critique d'inconfort chez le handicapé.

C. Mécanique ventilatoire

Tous les moyens d'assistance envisagés ici consistent à faire supporter le poids corporel alternativement par les jambes et les bras. En conséquence, le mode respiratoire est modifié. C'est ce qui apparaît sur les tracés de la fig. 3 qui donnent successivement les variations de la pression gastrique (qui rend compte de la pression abdominale), et de la pression œsophagiennes (qui rend compte de la pression intrapulmonaire), les variations du volume pulmonaire et le débit aérien.

On remarque immédiatement les élévations de pression gastrique qui correspondent à chaque pas.

Les hyperpressions les plus fortes (*tableau 1*) s'observent avec les béquilles axillaires (R.B.) et la tribune (J.L.). Les variations de pression enregistrées suggèrent l'existence d'un effort à composante thoraco-abdominale. Classiquement, l'exercice thoraco-abdominal correspond à un

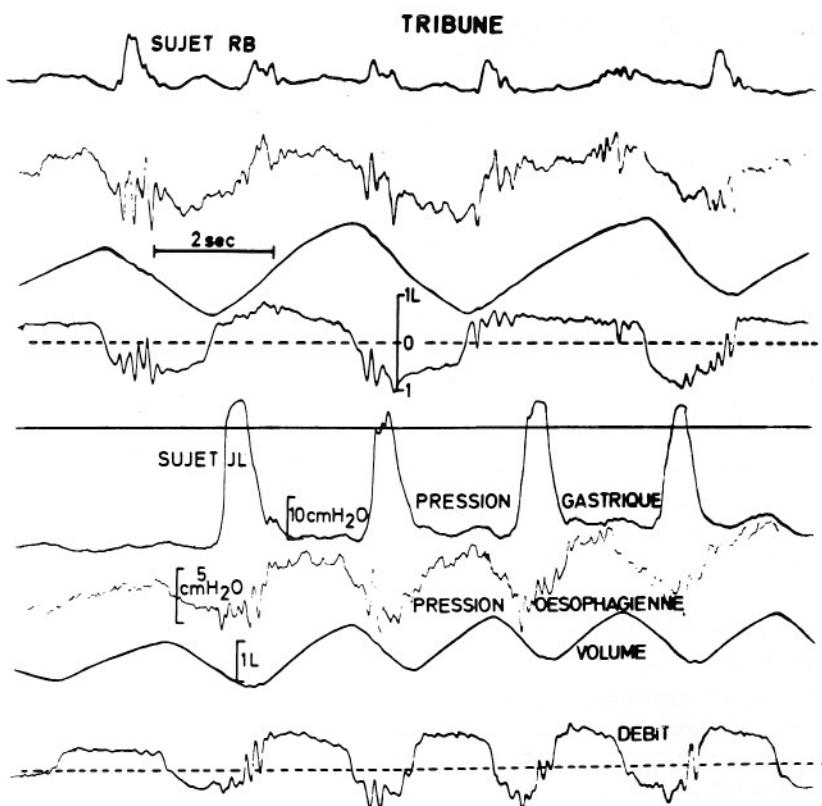


FIG. 3. – Variations des pressions gastrique et œsophagienne ainsi que du volume courant et du débit respiratoire dans la marche avec tribune chez 2 sujets.

TABLEAU I. – Variations des pressions œsophagienne et gastrique.

Paramètre	Type de progression	Sujets	
Pression Œsophagiennne (cm H ₂ O)	Repos	4,33	4,26
	Béquilles axillaires	12,15	10,27
	Béquilles allemandes	8,71	9,02
	Tripodes	8,29	8,33
	Tribune	9,47	10,13
Pression Gastrique (cm H ₂ O)	Repos	5,9	2,6
	Béquilles axillaires	13,11	6,76
	Béquilles allemandes	8,98	6,74
	Tripodes	7,11	37,45
	Tribune	11,69	43,85

effort exécuté contre glotte fermée et qui s'accompagne d'une hausse de la pression intrathoracique et de la pression abdominale dues à la contraction statique des muscles expirateurs. Ici, on ne peut parler d'effort thoraco-abdominal sensu stricto. En effet :

a. Les pressions thoracique et abdominale ne varient pas en phase,

b. Les valeurs des pressions observées sont loin d'atteindre les niveaux qui caractérisent les manœuvres respiratoires forcées. Dans ce cas, il est possible d'atteindre des valeurs de 200 à 400 cm H₂O (8, 9, 12). Certains efforts peuvent même entraîner la syncope lorsque les hyperpressions sont trop importantes (11).

Si les valeurs mesurées ici sont très en dessous, on peut toutefois retenir le chiffre de 43 cm H₂O (= 32 mm Hg) exercés par un des sujets. Cette pression correspond à peu près à la valeur atteinte dans le test de Flack qui constitue un type d'effort thoraco-abdominal standardisé.

Il faut rappeler que nos mesures ont été faites sur des sujets sains. On ne doit cependant pas oublier que des hyperpressions très bien tolérées par ceux-ci peuvent s'avérer dangereuses pour des handicapés du cœur et des poumons.

D. Sollicitation musculaire

L'origine des hausses de pressions gastrique et intrathoracique réside en grande partie dans le fait que la marche assistée fait appel aux membres supérieurs. Pour se contracter efficacement, les muscles de la ceinture scapulaire, du bras et de l'avant-bras doivent trouver un point d'appui solide. Cette condition est réalisée en rigidifiant l'ensemble tronc-bassin, d'où l'augmentation des pressions qui règnent dans les cavités thoracique et abdominale.

Les tracés électromyographiques de la *fig. 4* illustrent l'activité de 4 groupes musculaires qui, en condition de marche normale, n'interviennent pratiquement pas. Les enregistrements ont été pris à différents niveaux pour les deux moyens d'assistance qui engendrent les pressions les plus fortes.

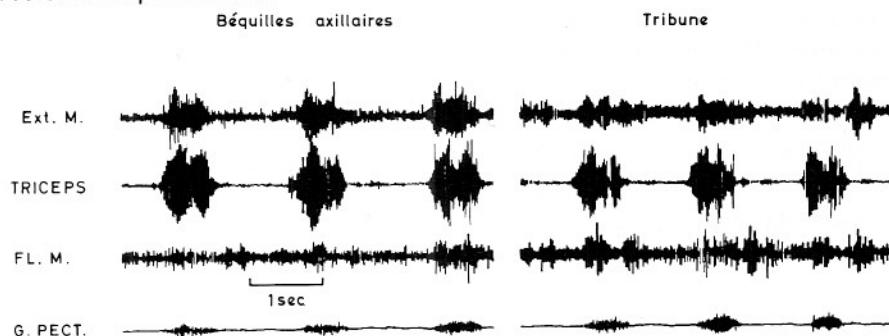


FIG. 4. – *Electromyogramme de surface de 4 groupes musculaires non-locomoteurs (extenseurs de la main, triceps brachial, fléchisseurs de la main et grand pectoral) au cours de la marche assistée avec bêquilles axillaires et tribune.*

Les tracés montrent que les phrases d'activité des 4 groupes musculaires sont synchrones. Pour les muscles de l'avant-bras, on observe une activité de type tonique, avec des maxima d'activité quand le sujet prend appui sur l'engin. Au niveau du triceps brachial et du grand pectoral, on a affaire à une activité de type phasique.

Le *tableau II* donne les valeurs moyennes d'activité électrique exprimée en pourcents de l'activité maximale. La participation de ces muscles est loin d'être négligeable. Dans tous les cas, le pectoral travaille à 75 % de son activité maximale. Il est intéressant de voir qu'avec les béquilles axillaires, l'effort des extenseurs de l'avant-bras et de la main est important, bien que le corps prenne appui sur les béquilles au niveau du creux axillaire. Par contre, avec les béquilles allemandes, le travail du triceps est considérablement réduit (37 %) du fait que le tiers supérieur de l'avant-bras prend appui sur l'engin. Pour la tribune et les tripodes, en plus du pectoral, ce sont les fléchisseurs de la main qui interviennent surtout, sans doute pour effectuer le transport et le positionnement de l'engin.

L'augmentation relativement importante de l'activité musculaire est vraisemblablement responsable, au moins pour une part importante, de l'augmentation du métabolisme et de la tachycardie.

TABLEAU II. – Activité électrique en % du maximum dans la marche assistée.

Muscles	Béq. Ax.	Béq. All.	Tribune	Tripodes
Extenseurs de la main	66,6 %	66,5 %	46,6 %	46,4 %
Triceps	57 %	37 %	48,5 %	57 %
Fléchisseurs de la main	28 %	40 %	60 %	60 %
Pectoral	75 %	75 %	75 %	75 %

CONCLUSIONS

La marche assistée entraîne un accroissement significatif de la dépense d'énergie et de la fréquence cardiaque. Elle exige la participation importante de muscles non locomoteurs et, de ce fait, perturbe l'acte respiratoire normal.

D'un point de vue pratique, toutes ces données indiquent que l'emploi de tripodes et de la tribune imposent des surcharges cardiovasculaires plus importantes que les autres engins.

Dans la mesure du possible, il faut donc préférer les béquilles allemandes aux autres moyens d'assistance.

Bibliographie

1. CAVAGNA G.A., THYS H. and ZAMBONI A. – The sources of external work in level walking and running. *J. Physiol. London*, 1976, 262, 639-657.

2. CHRISTENSEN E.H. – Beiträge zur Physiologie schwerer körperlicher Arbeit; VI Mitteilung : Der Stoffwechsel und die respiratorischen Funktionen bei schwerer körperlicher Arbeit. *Arbeitsphysiologie*, 1932, 5, 463-478.
3. INMAN V.T. – Conservation of energy in ambulation. *Bull. Pros. Res.*, 1968, 10/9, 26-35.
4. KENDALL H. and KENDALL F. – *Muscles testing and function*. Williams and Wilkins, Baltimore, 1949.
5. MARGARIA R. – Sulla fisiologia e specialmente sul consumo energetico della marcia e della corsa a varie velocità ed inclinazioni del terreno. *Reale Accad. Naz. Linc., Mem.*, 1938, 7, 299-368.
6. MARGARIA R. – Positive and negative work performances and their efficiencies in human locomotion. *Int. Z. angew. Physiol. einschl. Arbeitsphysiol.*, 1968, 25, 339-351.
7. MARGARIA R. – *Biomechanics and energetics of muscular exercise*. Clarendon Press, Oxford, 1976.
8. MILIC-EMILI G. et PETIT J.M. – Il lavoro meccanico respiratorio durante la massima ventilazione polmonare volontaria. *Boll. Soc. Ital. Biol. Sper.*, 1959, 35, 431.
9. MILIC-EMILI G. and PETIT J.M. – The pressure volume relationship of a forced breathing cycle. *Arch. internat. Physiol. Bioch.*, 1959, 67, 347-349.
10. MOYSE A.M. – Variations de quatre paramètres cardio-pulmonaires dans la rééducation à la marche après fracture du membre inférieur. *Mém. École Prov. Sup. Kin. et Ergo.*, Liège, 1971, n.p.
11. PETIT J.M. – Mécanisme de la syncope d'effort chez le sujet normal. *Acta Clin. Belg.*, 1959.
12. PETIT J.M. – Exercices respiratoires et notions récentes de mécanique ventilatoire. *Rev. Educ. Phys.*, 1961, 196, 1-32.