

LA MARCHE HUMAINE : TROIS PETITES NOTES DE MECANIQUE

Franck H Dujardin

CHU de Rouen

Les phénomènes mécaniques qui permettent la marche ont fait l'objet de nombreuses études dont l'histoire est ancienne. Au XVIIème siècle, Borelli publiait « *De Motu Animalum* » qui constitue une première approche biomécanique des mouvements alternés permettant de maintenir l'équilibre du centre de gravité du corps au cours de la marche. L'essor industriel du XIXème siècle est à l'origine de l'idée d'un « homme machine » ouvrant la voie aux « modélisations mécaniques ». En 1836, les frères Weber publiaient en Allemagne une description de la succession des phases constituant le déroulement du cycle de marche. Marey développait en 1873 la « chrono-photographie » permettant d'étudier le mouvement des membres au cours du cycle. En 1895, Braune et Fischer en Allemagne, avec un système semblable, parvenaient à mesurer le mouvement dans l'espace, en 3-dimensions, des segments de membre. Ces mouvements et la connaissance de la masse partielle des segments, leurs permettaient d'appliquer les lois de la dynamique au corps humain et d'effectuer les premières estimations des forces articulaires. Au XXème siècle, le développement des méthodes d'analyse ont permis de diversifier les approches de l'étude de la marche et d'établir des descriptions systématiques et détaillées. A l'aube du XXIème siècle, les modèles se complexifient, trois de ces notions nouvelles méritent d'être illustrées.

La marche n'est pas une succession de phases statiques, elle est dynamique. Le modèle de Pauwells calcule une force résultante sur la hanche équilibrée entre le poids du corps et la tension des muscles abducteurs. En condition statique cette résultante est très élevée, susceptible d'atteindre plusieurs fois le poids du corps. En réalité, le centre de gravité du corps connaît au cours de la marche – et plus encore au cours de la course – des accélérations verticales passant par des phases négatives, sortes « d'élans vers le haut ». Chacun connaît $F = m \cdot \gamma$. La force résultante de Pauwells, F , se trouve considérablement réduite par un γ négatif. Elle ne dépasse ainsi guère 80 à 90 % du poids du corps lors de la marche.

L'économie d'énergie intègre – la aussi (!) – des mécanismes de récupération. La dépense énergétique au cours de la marche stabilisée est très faible. En partie parce que chaque pas commence par l'élan acquis lors du pas précédant. Plus encore des dispositifs élastiques sont en tension lors de la phase d'appui et restituent cette énergie, acquise passivement, lorsque le poids du corps passe en avant du pied en appui, libérant l'énergie emmagasinée comme un ressort. Le rôle de l'aponévrose plantaire à cet effet est connu. Celui des trijumeaux l'ai moins, Ils n'ont pas, lors de la marche de rôle propulseur actif, leur contraction précède la phase d'appui (hors charge la dépense énergétique est alors très faible). Ils sont ainsi « prétendus » lors de l'attaque du talon et restituent, passivement, cette tension lors de la fin du déroulement du pas.

Les structures sont déformables. Les modèles mécaniques sont souvent présentés comme des ensembles de solides indéformables reliés par des liaisons, les articulations, parfaites. Rien n'est vrai dans ces modèles et les calculs qui en découlent le sont encore moins ! Parfois inverses d'une autre réalité. Les articulations comportant du cartilage et parfois des ménisques sont visco-élastiques ce qui induit des capacités d'amortissement et de dissipation d'énergie. Les segments sont déformables. L'expérience de marcher avec des chaussures de ski, indéformables, illustre bien l'intérêt physiologique du caractère naturellement déformable du pied. Or, tout l'organisme est déformable, lors de la phase d'appui, la flèche antéro-postérieure du fémur s'accroît par exemple de quelques dixièmes de mm. La prise en compte de ces propriétés d'amortissement et de déformation dans les

modèles est extrêmement difficile, de plus beaucoup de données sont manquantes. Les premiers résultats sont pourtant enthousiasmants, par exemple, l'épaisseur optimale du ciment autour d'une tige de Charnley est inverse, selon que l'on considère un modèle rustique, liaisons parfaites et structures indéformables ou un modèle plus sophistiqués, dans lequel les liaisons glissent et les structures plient. The French paradox !