

Marcher comme un athlète

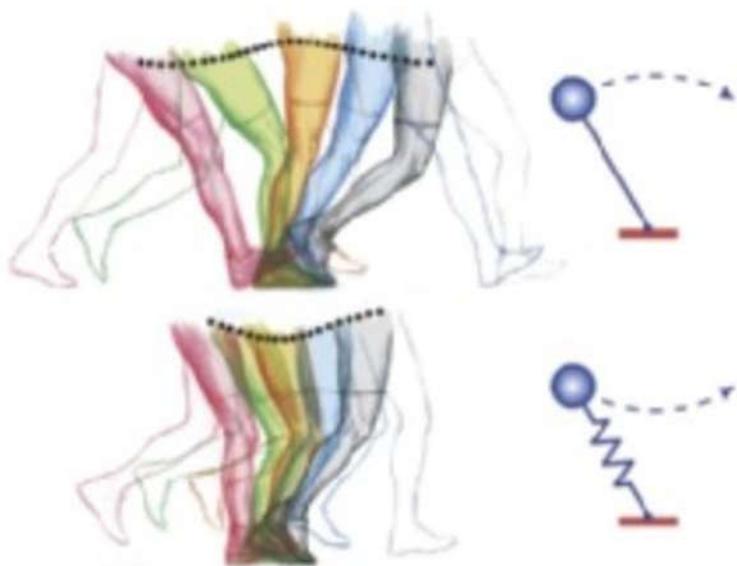
Pour se déplacer sans véhicule, l'homme a deux possibilités : la marche et la course. La première n'est pas forcément plus lente que la seconde.

Pour le néophyte, l'allure des marcheurs de compétition est singulière. Plus étonnante encore est son efficacité. Ainsi, le record du Monde sur 50 kilomètres, détenu par le champion Yohann Diniz, est de 3 heures 32 minutes et 33 secondes, soit une moyenne de 14,4 kilomètres par heure, alors que nous nous mettons spontanément à courir dès que notre vitesse dépasse les six à huit kilomètres par heure. Les raisons qui nous font passer de la marche à la course nous feront comprendre pourquoi cette discipline sportive est si codifiée et comment de telles performances sont possibles.

Marcher ou courir : les différences

Première différence entre la marche et la course : lorsque nous marchons, nous avons toujours au moins un pied en contact avec le sol; de plus, entre deux foulées, nos deux pieds touchent terre simultanément. En revanche, la course se caractérise par une phase de suspension en l'air, sans appui. La première règle de la marche athlétique est donc évidente: le marcheur doit constamment avoir un appui au sol.

Une deuxième caractéristique de la marche est que la jambe d'appui est tendue. En gros, cette jambe se comporte comme un pendule inversé, c'est-à-dire comme une barre rigide dirigée vers le haut effectuant sous l'effet de la gravité une rotation autour de son extrémité en contact avec le sol (voir la figure 1).



1. Lorsqu'on marche (en haut), la hauteur du centre de gravité du corps est maximale quand la jambe est verticale ; le mouvement de la jambe ressemble à celui d'un pendule inversé (en haut à droite). Au contraire, lorsqu'on court (en bas), le centre de gravité est au plus bas quand la jambe est à peu près verticale ; le mouvement ressemble à celui d'un pendule inversé avec une tige élastique (à ressort).

Afin d'amorcer le mouvement, nous nous déséquilibrions vers l'avant. Quand le pied est en appui, la jambe pivote autour de la cheville et, au moment où elle bascule, nous avançons notre seconde jambe, qui prend le relais, et ainsi de suite. Notons que, pendant que la jambe se redresse, la vitesse du déplacement diminue et le centre de gravité du corps s'élève; ce centre de gravité atteint sa hauteur maximale lorsque la jambe est verticale.

La course, elle, met en jeu une flexion de la jambe d'appui. Cette jambe se comporte comme un ressort qui se comprime lors des phases d'appui : le centre de gravité du corps est donc au plus haut durant la phase de suspension et au plus bas lorsqu'il passe au-dessus du pied, quand la jambe est fléchie au maximum. Un critère précis permet donc de distinguer marche et course : la position du centre de gravité lorsqu'il est à la verticale du point d'appui. S'il est à sa hauteur maximale, c'est de la marche; dans le cas contraire, il s'agit de course.

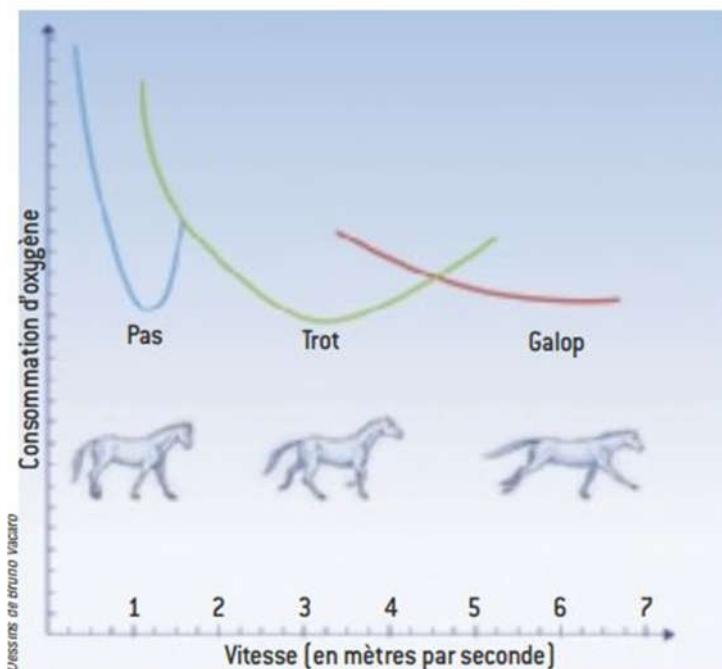
On saisit donc la raison d'une deuxième règle de la marche sportive: le marcheur doit bien tendre sa jambe à partir du moment où le talon touche le sol et jusqu'à ce que le centre de gravité passe au-dessus du pied. Avec cette règle, on évite la fameuse « course en marchant » de Groucho Marx (voir la figure 2).



2. Un marcheur sportif doit maintenir sa jambe tendue à partir du moment où son talon touche le sol et jusqu'à ce que le centre de gravité du corps passe au-dessus du pied. Il ne peut profiter de l'élasticité des muscles, comme le faisait au cinéma Groucho Marx en marchant à vive allure les jambes fléchies – une sorte de marche-course qui a son analogue chez les éléphants.

En gardant les jambes très fléchies, il est en effet possible de courir, c'est-à-dire de profiter de l'élasticité des jambes, en conservant ses appuis au sol. Cette marche cinématographiquement inoubliable n'a pas cours dans les stades, mais a le mérite de rendre compte du mode de locomotion rapide des éléphants : ils courrent, bien qu'ils ne décollent pas du sol !

Pourquoi, passée une certaine vitesse, préférons-nous courir ? De même, pourquoi un quadrupède comme le cheval passe-t-il du pas au trot, puis au galop (voir la figure 3) ?



3. À une vitesse de déplacement donnée correspond en général un mode de locomotion optimal du point de vue énergétique, comme le montrent les trois courbes de consommation d'oxygène (par unité de distance parcourue) relatives au pas, au trot et au galop d'un cheval. De même, l'homme a intérêt à marcher aux petites vitesses, mais à courir dès que la vitesse doit dépasser environ six kilomètres par heure.

Le premier avantage de la transition est énergétique. En principe, l'énergie nécessaire pour se déplacer sur un sol horizontal est très faible puisqu'il s'agit surtout de vaincre les frottements avec l'air. Les cyclistes qui se mettent en roue libre le savent bien. Mais en pratique, nous n'avons pas de roue et nous avançons en effectuant de subtils transferts entre différentes formes d'énergie.

Pour la marche, lorsque notre centre de gravité passe au-dessus du pied, la vitesse et l'énergie cinétique du corps sont minimales et l'énergie est stockée sous forme d'énergie potentielle de gravitation. Pour la course, nous profitons de l'énergie élastique des tendons et des muscles. La restitution et la dépense d'énergie sont cependant loin d'être idéales: outre les aspects physiologiques, la pose du pied au sol freine la jambe et dissipe son énergie cinétique, et il faut à chaque foulée ramener la seconde jambe vers l'avant.

Les mesures montrent que, pour parcourir une distance donnée, la marche est énergétiquement plus économique que la course aux petites vitesses, et que c'est l'inverse aux vitesses supérieures. En outre, pour chacune de ces allures, il existe une vitesse optimale, avec une dépense énergétique minimale. Et plutôt que de se déplacer toujours à la même vitesse, il est préférable d'alterner marches et courses, comme les fantassins du Moyen Âge qui accompagnaient leurs seigneurs à cheval : ils ajustaient leur vitesse moyenne en jouant sur les durées respectives de ces deux allures.

Passer de la marche à la course

Ce résultat permet de comprendre nos choix sur une longue distance, mais, pour élucider la transition marche-course, il faut étudier les forces. Le mouvement de la jambe d'appui en pendule inversé est une rotation, au cours de laquelle notre corps subit une force centrifuge dirigée le long de la jambe. Cette force est d'autant plus grande que la vitesse augmente, et elle s'oppose au poids lorsque la jambe est verticale. Aussi, quand ces deux forces sont égales, il n'y a plus d'appui possible au sol – donc plus de marche.

Le rapport entre la force centrifuge et le poids, nommé nombre de Froude, est égal au carré de la vitesse divisé par le produit de la longueur des jambes et de l'accélération de la pesanteur. L'égalité des forces est obtenue lorsque ce nombre est égal à un. Pour un adulte dont les jambes mesurent un mètre, cela correspond à une vitesse de l'ordre de trois mètres par seconde, c'est-à-dire dix kilomètres par heure.

En réalité, la transition marche-course a lieu pour des nombres de Froude inférieurs, de l'ordre de 0,5 (environ deux mètres par seconde). Pourquoi ? À mesure que la vitesse croît, la composante verticale de la force d'appui subit des variations de plus en plus importantes, la force centrifuge étant augmentée en milieu de foulée. L'élasticité des muscles et des tendons de la jambe est alors de plus en plus sollicitée. Au-delà d'une certaine contrainte, il devient plus confortable de passer d'un mode rigide à un mode élastique et notre corps passe spontanément de la marche à la course.

La marche athlétique permet pourtant d'atteindre, sur de courtes distances, des vitesses de 17 kilomètres par heure, soit des nombres de Froude bien au-delà de un ! Ici, l'effet de la force centrifuge est diminué grâce au mouvement des bras du marcheur ; on limite ainsi l'amplitude des oscillations du centre de gravité afin de ne pas décoller. Ce sont ensuite les articulations qui sont mises à profit pour amortir les chocs ; une fois le pied posé, la pointe du pied relevée, on déroule la cheville. Enfin, des mouvements de rotation du bassin, caractéristiques, permettent d'allonger la foulée. Toute cette impressionnante technique ne doit cependant pas faire oublier au marcheur la règle d'or : c'est la gravité qui assure la propulsion et sa chute continue qui le fait avancer.

Jean-Michel COURTY et **Édouard KIERLIK** sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris.

H. GEYER *et al.*, *Compliant leg behaviour explains basic dynamics of walking and running*, in *Proc. R. Soc. B*, vol. 273, pp. 2861-2867, 2006.

A. J. RAYNORA *et al.*, *Are transitions in human gait determined by mechanical, kinetic or energetic factors ?*, in *Human Movement Science*, vol. 21, pp. 785-805, 2002.