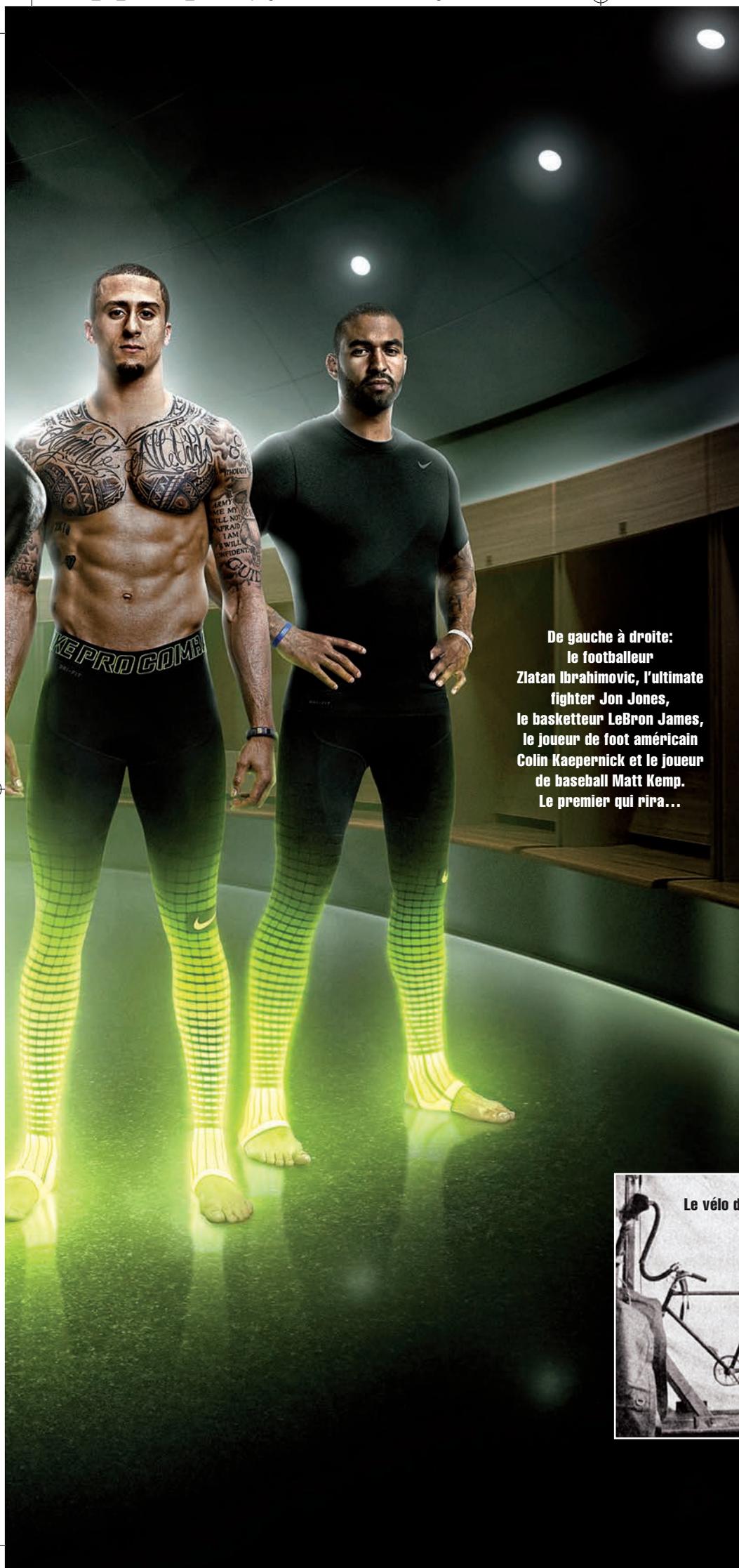


PHYSIOLOGIE

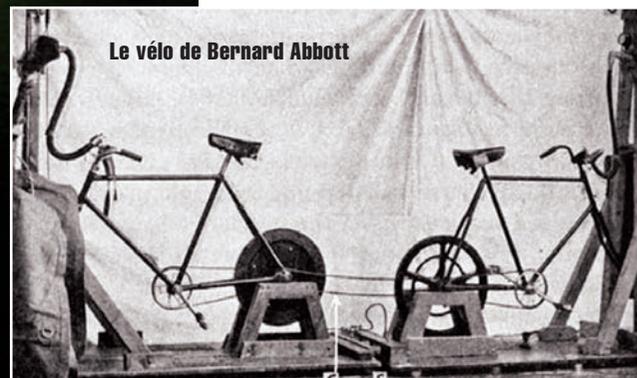
Malin comme un muscle

Nous en avons rarement conscience mais, chacun de nos mouvements implique une fine orchestration d'une multitude d'actions musculaires. On peut en effet parler d'une véritable intelligence du geste. En sport, celle-ci conditionnerait même le niveau de performance.



**De gauche à droite:
le footballeur
Zlatan Ibrahimovic, l'ultimate
fighter Jon Jones,
le basketteur LeBron James,
le joueur de foot américain
Colin Kaepernick et le joueur
de baseball Matt Kemp.
Le premier qui rira...**

Les muscles forment à eux seuls un monde fascinant! On dit qu'ils sont «effecteurs» de mouvements car seule l'alternance de leurs phases de contraction et de relâchement permet d'articuler les segments et donc de se mouvoir: nager, boxer, taper dans un ballon ou se brosser les dents. Pour simplifier, on pourrait être tenté de comparer ces muscles à des petits moteurs hydrauliques. Mais il existe une différence de taille entre les deux: le rendement! Les muscles sont incroyablement plus performants que n'importe quelle machine inventée par les hommes. En courant, nous sommes ainsi capables d'exploiter de façon utile la moitié de l'énergie consommée (50%). A titre de comparaison, retenez que les moteurs à explosion ultrasophistiqués qui équipent nos voitures plafonnent aux alentours de 10-15% sur petits trajets urbains. Les muscles sont donc des effecteurs de mouvements tout à fait exceptionnels, surtout lorsqu'on prend en compte la petitesse des unités contractiles (2 microns) par rapport à celle du moteur à explosion, presque un million de fois plus élevée. Or un système est généralement plus performant quand sa taille est importante. C'est dire l'ingéniosité de la machinerie. En utilisant nos muscles intelligemment, on peut même optimiser leur rendement. Voici une expérience ingénieuse menée par Bernard Abbott et ses collègues de l'Université de Londres (1). En 1952, ils avaient imaginé un dispositif avec deux bicyclettes ergométriques placées dos à dos et couplées mécaniquement par une chaîne. Lorsque le premier cycliste pédalait, les jambes du second tournaient dans l'autre sens et vice-versa. Cela permettait d'organiser des petits matchs de puissance entre coureurs qui se soldaient toujours par un statu quo. En clair, il était pratiquement impossible pour le premier cycliste d'entraîner l'autre dans



Le vélo de Bernard Abbott

PHYSIOLOGIE

un mouvement de pédalage, à l'endroit comme à l'envers, si le second cycliste avait décidé d'utiliser toutes ses forces pour résister. Le dispositif permettait aussi de varier les conditions de l'expérience et de mesurer par exemple la puissance positive ou négative développée par chacun des deux sujets grâce à un capteur de force placé entre les deux vélos. De plus, les auteurs avaient pris soin de mesurer l'énergie dépensée par la méthode, déjà maîtrisée à l'époque, des sacs de Douglas. Pendant l'effort, les sujets devaient expirer dans un grand sac étanche et on déterminait leur consommation d'oxygène sur base de la différence entre la composition gazeuse de ces sacs et celle de l'air ambiant. Cette expérience avait permis de constater que le rendement musculaire d'un travail négatif était trois fois supérieur à celui d'un travail positif. En clair, cela veut

Yanagida, le chercheur excentrique

Nous sommes en 2006 dans le laboratoire de physiologie de l'Université d'Osaka dirigé par le chercheur japonais, Toshio Yanagida. A la manière de son collègue sud-africain Tim Noakes, Yanagida n'hésite pas à remettre en question les anciens dogmes en sciences du sport. Dans les cours de physiologie, on enseignait en effet que la contraction musculaire s'effectue dans la proportion de 1 pour 1, c'est-à-dire qu'à un événement mécanique (coulisement des filaments d'actine et de myosine) correspond obligatoirement un événement chimique (dégradation d'une molécule d'ATP) (2). De fait, c'est ce qui se passe dans un registre concentrique, par exemple lorsqu'on roule à vélo. Tout change si l'effort ne

consiste plus à tourner soi-même les jambes, mais à résister aux forces extérieures de rotation comme dans le cas du deuxième cycliste dans la fameuse expérience d'Abbott. On se trouve alors dans un registre de contraction dit excentrique et, de ce fait, le rendement se révèle bien meilleur. Yanagida a démontré que dans ces conditions, le rapport mécanique/chimique passait à 5 contre 1. Une molécule d'ATP pouvait entraîner 5 événements mécaniques (3). Par quel miracle? La compréhension de ce phénomène nécessite que l'on ravive quelques notions de biochimie de l'exercice probablement enfouis très profond dans notre mémoire. Ainsi, le raccourcissement d'un muscle résulte toujours d'un coulisement des myofilaments qui le constituent. Les têtes de myosine s'attachent au filament d'actine et le tractent pour raccourcir l'ensemble de l'unité contractile. Ensuite, ces têtes se détachent jusqu'à ce qu'une nouvelle molécule d'ATP soit dégradée en ADP + un phosphate inorganique, libérant ainsi l'énergie nécessaire à un renouvellement du cycle. Voilà ce que l'on enseignait sur les bancs des facultés. Or toutes ces belles explications sont battues en brèche lorsque les contraintes mécaniques s'exercent dans un processus d'étirement. Ici, les têtes de myosine basculent à l'inverse de leur sens habituel, ce qui leur permet de refixer le phosphate inorganique précédemment libéré. Elles peuvent alors s'attacher de nouveau et produire de

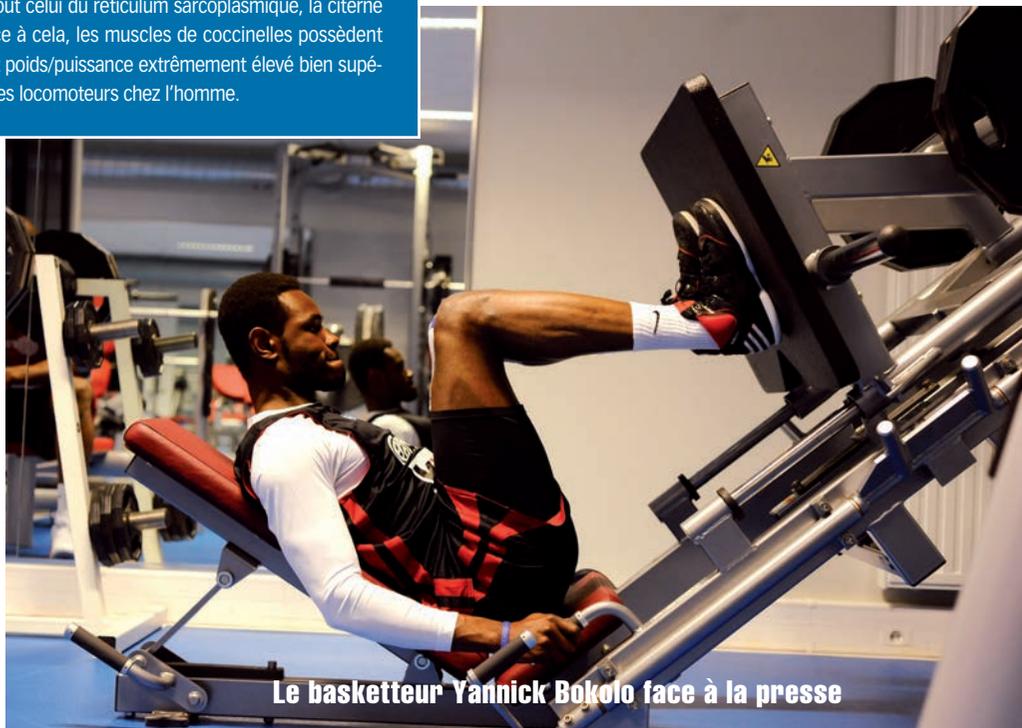
UN AMOUR DE COCCINELLE

Parmi leurs nombreuses qualités, les muscles sont également capables d'adapter leur régime de fonctionnement aux conditions de vie. Prenons l'exemple d'une coccinelle. Pour voler, il lui faut battre des ailes à toute vitesse. Pas question donc d'observer une longue période réfractaire entre chaque contraction. De plus, ses muscles doivent être très légers. Sinon, la coccinelle serait incapable de décoller. La solution? Ces insectes l'ont trouvée en adoptant une musculature asynchrone, c'est-à-dire que les mouvements d'ailes se font de manière décalée dans le temps.



Une seule impulsion nerveuse entraîne la contraction répétée d'une fibre musculaire. Grâce à cela, la coccinelle peut atteindre une cadence de battements de plus de 100 hertz contre un maximum de 10 en mode synchrone. Et l'avantage ne s'arrête pas là! Le fait qu'une seule bouffée de calcium détermine 10 oscillations des ailes permet de diminuer le poids embarqué du calcium et surtout celui du réticulum sarcoplasmique, la citerne à calcium. Grâce à cela, les muscles de coccinelles possèdent ainsi un rapport poids/puissance extrêmement élevé bien supérieur aux muscles locomoteurs chez l'homme.

dire qu'on consomme moins d'énergie lorsqu'on doit résister à un mouvement et beaucoup plus quand on doit le produire. Ce qui se vérifie facilement en salle de musculation. Ainsi on parvient sans trop de souffrance à descendre lentement en position accroupie avec une très lourde charge sur les épaules, alors que le trajet inverse pose beaucoup plus de problème. Tous les manieurs de fonte le savent bien! Mais pendant longtemps l'explication de ce phénomène est demeurée mystérieuse. Décidément génial, le professeur Abbott émit alors une hypothèse qui reçut confirmation un demi-siècle plus tard. «Le travail négatif doit certainement déterminer une inversion des processus chimiques» écrit-il. Bingo! C'est effectivement ce que montrent des travaux récents.



Le basketteur Yannick Bokolo face à la presse



Plage d'entraînement excentrique

nouvelles forces sans consommer une nouvelle molécule d'ATP. On passe donc d'une situation où la dégradation d'une molécule d'ATP entraîne une seule action de coulisement en mode concentrique, à une configuration en mode excentrique où, pour la même dépense, on enregistre trois cycles mécaniques de production de force. Au bout du compte, nous sommes en moyenne trois fois plus économiques en mode excentrique. A pleine puissance, nous sommes aussi beaucoup plus forts.

Le mystère de la deuxième tête enfin résolu!

Un grand nombre de disciplines sportives repose précisément sur cette capacité à résister à des forces importantes. Songez par exemple aux descendeurs alpins qui restent en position de recherche de vitesse pendant plusieurs minutes grâce précisément à des muscles surpuissants au niveau des cuisses. En physiologie, une opération, appelée biopsie, consiste à prélever une petite carotte dans la masse musculaire. Lorsqu'on procède à cet examen chez des skieurs de haut niveau précisément, on s'aperçoit avec surprise qu'ils sont dotés de très

nombreuses fibres lentes (4). Bizarre! De prime abord, on se serait attendu en effet à ce qu'ils soient équipés d'une musculature de type explosif plus proche de celle des sprinteurs avec lesquels ils partagent d'ailleurs une hypertrophie musculaire. Et pourtant, non. On retrouve chez eux de nombreuses fibres musculaires lentes à l'instar des marathoniens. Pour quelles raisons? En réalité, ces fibres lentes sont particulièrement aptes à résister au travail négatif. Lors d'expériences sur fibres isolées, on a montré qu'elles pouvaient développer une force 2,5 fois plus élevée que la force maximale isométrique (5). Comment est-ce possible alors que l'on sait par expérience que la force développée par pont actine-myosine est constante et que la seule façon d'augmenter la force totale consiste à multiplier les ponts? L'équipe du professeur Lombardi à l'université de Florence a résolu ce problème. Ces chercheurs ont démontré qu'un étirement de 5 nanomètres au sein de l'unité contractile suffisait à déterminer le recrutement de la deuxième tête de myosine et cela en seulement quelques millisecondes seulement (6). Ce faisant, il levait aussi l'un des plus grands mystères de la physiologie de l'exercice. Grâce à l'observation au microscope électronique, on savait en effet

que la myosine possédait une structure dimérique, c'est-à-dire que chaque filament est équipé de deux têtes alors qu'il n'existe de la place que pour une sur le filament d'actine. On se demandait alors à quoi pouvait bien servir cette deuxième tête qui regarde bêtement sa sœur jumelle travailler à grande vitesse. Dans le régime concentrique, elle ne sert effectivement à rien. Mais lorsqu'on fait un travail excentrique, l'étirement de l'unité contractile réduit l'encombrement stérique et cela permet l'attachement de la deuxième tête. La force s'en trouve formidablement accrue. D'autant que d'autres acteurs viennent encore solidifier le montage comme la «protéine C» qui réduit considérablement la distance entre les filaments d'actine et de myosine et augmente ainsi la probabilité que la deuxième tête se fixe. Il y a aussi la «titine» une protéine géante qui traverse l'unité contractile de part en part et s'attache sur la myosine, exerçant une traction longitudinale de nature à redresser les têtes de myosine, y compris la deuxième, afin de faciliter leur interaction avec l'actine (7). En somme lors de la course en descente ou lors de sauts en contrebas, plusieurs mécanismes convergent pour faciliter le travail des têtes de myosine et offrir un meilleur rendement

PHYSIOLOGIE

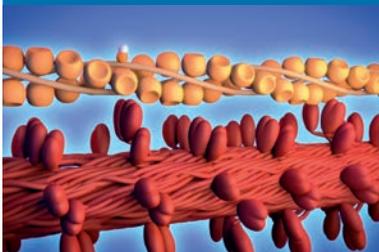
et de plus grands niveaux de force par rapport à la contraction pure et simple. Il en découle naturellement des applications pour l'entraînement. Car finalement que cherchent les athlètes en phase de renforcement musculaire? Une augmentation du nombre de ponts actine-myosine! C'est effectivement l'élément-clé qui conditionne la force musculaire. Dans ce cadre-là, le travail excentrique se révèle beaucoup plus efficace que le concentrique simple. En pratique, cela signifie qu'on doit multiplier les exercices qui consistent à résister négativement à une force supérieure à la sienne. Lorsqu'on fait des squats en salle, on ne se contentera pas de se relever de la position accroupie avec la barre sur les épaules. On pensera aussi à la surcharger à la descente en demandant par exemple à un collègue de se pendre dessus. Des sauts en contrebas avec ou sans

Margaria, le pape de la physiologie de l'exercice en 1972 à Milan. Des sujets assis sur une chaise devaient se lever puis se rasseoir et on mesurait la différence d'énergie dépensée avec un mouvement un peu différent au cours duquel on partait de la position debout et on devait s'asseoir et puis se relever (8). Dans les deux cas, les muscles des cuisses étaient sollicités, une fois à la descente et une fois à la montée. Mais figurez-vous que dans la première condition, c'est-à-dire lorsque la remontée précédait la descente, la dépense énergétique totale était 22% plus élevée que lorsqu'il fallait d'abord s'asseoir et puis se relever. Extraordinaire, non? L'explication réside dans une autre caractéristique subtile du muscle: sa capacité à emmagasiner de l'énergie élastique en phase d'étirement. Lorsqu'on s'assied puis qu'on se relève, et

pour peu qu'on procède à ces deux exercices relativement vite, on bénéficie d'un surcroît de force qui n'existe pas dans le cas contraire. Cette stratégie de l'élastique intervient peu ou prou dans quasiment tous les mouvements naturels comme la course, les sauts, les lancers, le patinage ou encore le ski de fond. On étire brièvement les muscles avant de les contracter. Et le génie des meilleurs athlètes réside peut-être dans cette organisation gestuelle où tout se joue au millième de seconde. Est-ce une question de timing? Pas seulement. Il se pourrait aussi qu'on enregistre là l'influence de caractéristiques héréditaires: tendons plus longs, muscles plus riches en éléments élastiques, tout cela peut favoriser le stockage et la restitution de l'énergie. Quoi qu'il en soit, on se facilite beaucoup la vie en exploitant au mieux les différents «ressorts» dont la nature nous a pourvus. Car il s'agit bien des ressorts! Les fibres de collagène réticulé qui composent le tendon possèdent des caractéristiques viscoélastiques proches de celles des fils métalliques torsadés qui équipent nos matelas et même une résistance à la rupture par unité de surface supérieure à celle de l'acier. C'est tellement solide qu'on se demande comment ces tendons peuvent parfois être pris en défaut et lâcher en plein effort... Le plus souvent, le problème résulte

UN CALCIUM À LA MER!

Le calcium joue un grand rôle dans le processus de contraction musculaire. Au repos, les sites actifs de la myosine sur l'actine sont masqués par un filament fin appelé «tropomyosine». Celui-ci change de position en présence de calcium et dégage ainsi les sites de fixation qui deviennent alors accessibles aux têtes de myosine. Pour produire une contraction, il faut donc sans cesse larguer et repomper ce calcium. Du point de vue énergétique, la phase de relargage ne coûte pas grand-chose. En revanche, la récupération représente à elle seule jusqu'à un quart de la consommation totale en ATP dans l'organisme car il s'agit évidemment d'un processus actif. On peut comparer cela à l'eau tirée du puits. Descendre le seau au bout de la corde ne coûte pas beaucoup d'effort. Le remonter, en revanche...



charge sont aussi envisageables. Comme l'exercice précédent, ils doivent assurément être réalisés avec des athlètes aguerris. Sinon, on court le risque de se faire beaucoup plus de mal que de bien. Les foulées bondissantes, les sauts à cloche-pied, les courses en descente. Tous ces exercices méritent de figurer au programme. A condition évidemment de maîtriser la technique.

Asseyez-vous, je vous en prie.

Le travail excentrique permet donc d'augmenter les forces auxquelles sont soumis les muscles. Et ce n'est pas son seul avantage. Utilisé à bon escient, il peut aussi améliorer assez nettement l'économie d'un geste. Cela fut démontré de superbe manière par le chercheur Henri Thys de l'Université de Liège alors en déplacement chez Rodolpho



Tous les sports marchent sur ressorts.
Ici la championne américaine de short track, Allison Baver



**Maria Sharapova
fait de
l'isométrie**

d'un état de surchauffe et d'une forte usure mécanique. On a mesuré ainsi qu'après plusieurs minutes de galop intense la température des tendons du cheval dépassait les 40°. Or, à ce stade, les protéines changent de conformation. Elles se déplient. Elles se fragilisent. Et leurs fonctions s'en trouvent altérées. Selon toute vraisemblance, ce mécanisme existe aussi chez l'homme avec une amplitude de chauffe un peu plus restreinte. Comme les tendons sont très mal vascularisés, ils éprouvent de grandes difficultés pour se réparer. Mais lorsqu'ils sont pleinement fonctionnels, la vitesse en course à pied dépend à 80% de l'énergie élastique stockée dans les tendons. Les autres 20% sont pris en charge par les unités contractiles. Au total, la stratégie permet d'atteindre un rendement de 50% en course à pied alors qu'il n'est que de 25% lors de la marche.

La mort vous va si bien!

Certains exercices imposent de résister à des forces sans vraiment réussir à avancer. On a déjà donné l'exemple du skieur. Songez aussi aux premières lignes en rugby engagés dans une mêlée ou à l'haltérophile qui doit maintenir la barre au-dessus de la tête pendant deux secondes pour que son

mouvement soit homologué. Les muscles ne se raccourcissent pas. Ils ne s'allongent pas non plus. On parle de contraction isométrique. Là encore, il existe de précieuses stratégies pour s'épargner les efforts inutiles. L'une d'entre elles consiste pour le muscle à ralentir la libération du dernier produit de l'hydrolyse de l'ATP: l'ADP. Cela permet de stabiliser les liaisons fortes entre actine et myosine et donc de développer une force importante à moindre coût. En effet tant que l'ADP n'a pas quitté le nid, l'ATP ne peut se fixer et les têtes de myosine ne peuvent se détacher de l'actine. Cela tombe bien, car en isométrie, il n'est pas question de se détacher mais de produire une force constante en consommant le moins possible. Décidément la nature est bien faite. Les fibres lentes excellent tout particulièrement dans cette tâche (10). Une autre technique adoptée par le muscle consiste à faire le mort. De fait, une personne décédée se caractérise après quelques heures par une rigidité dite *cadavérique* tout à fait étonnante qui lui permettrait par exemple de tenir sur les mains sans peine pendant des heures. Cette «rigor activation» (en anglais) découle d'un épuisement des réserves d'ATP et d'une absence de système de régénération. Vivant, on ne peut pas parvenir au même

résultat. En somme, le muscle fait tout pour se faciliter le travail. On se réjouit qu'il en soit ainsi. Car sans ce déploiement d'outils ingénieux, nous tomberions vite en panne d'ATP et l'autonomie de nos journées de travail serait probablement divisée par deux. Bravo les muscles!

Par Antoni Philippe, Anthony MJ Sanchez et Robin Candau

Références

- (1) Abbott BC, Bigland B, Ritchie JM. *The physiological cost of negative work.* *J Physiol.* 1952 Jul;117(3):380-90.
- (2) Anatomie et physiologie humaine, Adaptation de la 6ème édition américaine Elaine N. Marieb (Auteur) - Scolaire / Universitaire (broché). Paru en 06/2010
- (3) Esaki S, Ishii Y, Nishikawa M, Yanagida T. *Cooperative actions between myosin heads bring effective functions.* *Biosystems.* 2007 Apr;88(3):293-300.
- (4) Karlson J et al. *Etude physiologique du ski alpin.* Edité par les colloques de physiologie médico-sportive-Saint Etienne 1978
- (5) Linari M, Woledge RC, Curtin NA *Energy storage during stretch of active single fibres from frog skeletal muscle.* *J Physiol.* 2003 Apr 15;548(Pt 2):461-74.
- (6) Brunello E, Reconditi M, Elangovan R, Linari M, Sun YB, Narayanan T, Panine P, Piazzesi G, Irving M, Lombardi V. *Skeletal muscle resists stretch by rapid binding of the second motor domain of myosin to actin.* *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2007 Dec 11;104(50):20114-9.
- (7) Minozzo FC, Lira CA. *Clinics (Sao Paulo).* 2013;68(2):269-74. *Muscle residual force enhancement: a brief review.*
- (8) J Thys H, Faraggiana T, Margaria R. *Utilization of muscle elasticity in exercise.* *Appl Physiol.* 1972 Apr;32(4):491-4.