

Le mouvement d'escalade

Celui du grimpeur entraîné, harmonieux et fluide, correspond à une économie de fréquences.

Chez l'enfant, la marche est une succession de pas gérés de façon indépendante. À mesure que la coordination musculaire et articulaire s'affine et que le cerveau établit les réseaux nécessaires à la locomotion, la marche devient plus fluide ; chaque pas fait alors partie d'un ensemble, le déséquilibre déclenché par un pas servant à engendrer le suivant. Peut-on quantifier les mécanismes de l'apprentissage de la locomotion ? Les lois de la physique sont-elles applicables à cet apprentissage ? Nous avons, dans cette optique, modélisé le mouvement d'escalade et suivi son évolution au cours de l'apprentissage : à mesure que l'expertise s'améliore, le mouvement devient harmonieux... et harmonique. Tel celui d'un oscillateur harmonique, le mouvement d'un grimpeur expert est assimilable à un mouvement de balancier ; les fréquences de tous ses mouvements sont des multiples d'une fréquence fondamentale.

On classe les chemins d'escalade en fonction de leur difficulté, sur une échelle qui s'étend de un à neuf, chaque échelon étant lui-même subdivisé en trois sous-niveaux. Les grimpeurs experts franchissent des chemins dont la difficulté est supérieure à sept. Les autres sont qualifiés de non-experts.

Nous avons étudié le mouvement de grimpeurs experts et non experts. Pour ce faire, nous avons construit, à l'École nationale de ski et d'alpinisme de Chamonix, une voie d'escalade sur une structure artificielle d'escalade de dix mètres de hauteur et de difficulté moyenne. Nous repérons le grimpeur par une marque fluorescente collée à la hauteur du bassin et nous le filmons. La trajectoire du grimpeur, assimilée à celle du repère fluorescent, est enregistrée et analysée. On demande à chaque sujet de grimper dix fois de suite la même voie d'escalade, afin d'obtenir une série de mesures qui traduisent

l'adaptation plus ou moins rapide du grimpeur aux contraintes exercées par la pesanteur et par l'environnement.

L'analyse de la trajectoire des grimpeurs expérimentés montre que, au début, la gestuelle est limitée, mais que dès la deuxième tentative, le répertoire augmente et la motricité est optimisée. Selon notre modèle, les deux premières trajectoires du grimpeur expert ne sont pas harmoniques, mais les suivantes le deviennent. On peut assimiler le grimpeur expert à un oscillateur. En outre, le comportement moteur harmonique minimise l'énergie mécanique dépensée, même pour les pas de grande amplitude. Au contraire, les sujets non experts gèrent leur progression pas à pas, comme un enfant qui commence à marcher. À mesure qu'ils apprennent à connaître la paroi, leur mouvement devient plus fluide et, à la dixième tentative, leur mouvement se rapproche de celui d'un expert.



Un grimpeur expert franchit les parois difficiles avec un mouvement régulier de balancier, qui minimise l'énergie mécanique dépensée.

Ce modèle harmonique est adapté à l'interprétation des comportements moteurs rythmés. L'adaptation aux contraintes environnementales, que nous qualifions d'apprentissage, représente l'optimisation d'un comportement moteur complexe. Lorsqu'une contrainte nouvelle est appliquée au système, le comportement moteur est perturbé et la trajectoire du grimpeur s'éloigne de l'harmonie. Puis, au cours des répétitions, le comportement moteur s'en rapproche à nouveau. Cette convergence est plus rapide chez le sujet expert (trois essais suffisent) que chez le sujet non expert (plus de dix essais sont nécessaires).

Enfin, nous avons mis en évidence que les deux dynamiques (celle de l'expert et celle du non-expert) sont de natures différentes, que l'on ne passe pas de l'une à l'autre par un optimisation progressive, mais par un mécanisme discret (par paliers).

LA QUALITÉ HARMONIQUE DU MOUVEMENT

Notre analyse met l'accent sur la qualité harmonieuse de la prestation et non sur le résultat d'une performance où la force musculaire peut pallier les manques de plasticité et d'adaptabilité du comportement moteur. Nous avons constaté qu'en compétition, certains grimpeurs compensent une absence d'harmonie de leur comportement moteur par une force musculaire qui leur permet d'atteindre le but. Une telle dépense d'énergie n'est pas compatible avec un effort de longue durée en milieu naturel, de sorte que les grimpeurs de compétition, qui n'ont pas un mouvement harmonique, manquent d'endurance.

Nous allons poursuivre cette étude en recherchant si l'habileté motrice, qui aboutit à une expertise, s'accompagne nécessairement de l'apparition d'un mouvement de type harmonique, notamment si l'apprentissage de la marche en terrain accidenté suit les mêmes lois que l'apprentissage de l'escalade. Ce type d'étude devrait aussi faciliter la rééducation des personnes accidentées qui ont subi des lésions osseuses ou neurologiques : en analysant comment ces personnes réapprennent à marcher, nous pensons les aider à retrouver un mouvement harmonique.

Gilles DIETRICH, INSEP, Paris
Patrick CORDIER, ENSA, Chamonix

Imaginer la performance

On suit en temps réel la qualité de l'entraînement par imagerie mentale.

Quel athlète n'a jamais rêvé à sa prochaine compétition ? Qu'ils mettent en scène la victoire ou l'échec, ces rêves n'ont pas de conséquences mesurables. Le rêve éveillé est, en revanche, utile au sportif de haut niveau : l'entraînement par imagerie mentale, au cours duquel l'athlète retrouve, sans effectuer aucun mouvement, toutes les sensations visuelles, tactiles et motrices associées à l'action elle-même, améliore les performances. Au cours de cet « entraînement interne », le comportement du système neurovégétatif (qui régule les fonctions organiques viscérales et somatiques telles que la respiration ou la rythmicité cardiaque) est caractéristique, comme en situation réelle, de la qualité de la performance. Un entraîneur qui suit les manifestations du système nerveux autonome d'un sportif peut donc l'aider à améliorer ses images mentales.

Dans la plupart des disciplines sportives, l'entraînement par imagerie mentale améliore les performances. L'efficacité de cette pratique varie toutefois selon les individus, le type de tâche et le niveau d'apprentissage. Tandis que les deux derniers paramètres sont facilement identifiables et que leur rôle est connu, la compréhension de la variabilité interindividuelle nécessite l'accès aux images mentales créées par chacun.

Constituant fondamental du psychisme pour les Grecs, l'image mentale ne fut analysée, jusqu'au XX^e siècle, que par introspection psychologique. Michel Denis, de l'Université d'Orsay, a rattaché l'activité d'imagerie à l'étude plus générale de la représentation cognitive et aux activités sémantiques.

L'image mentale est plus difficile à aborder en neurophysiologie : comment en mesurer les caractéristiques ? Les travaux des équipes de Roger She-

SPORTIF EN PLEINE IMAGERIE MENTALE

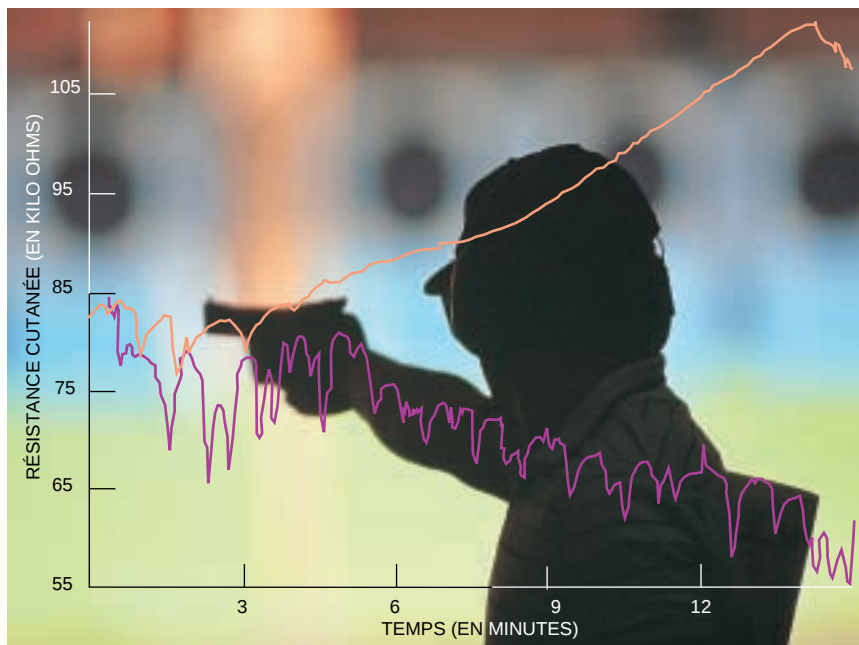


pard, à Stanford, et de Stephen Kosslyn, à Harvard, ont montré que les images sont, sous certains aspects, analogues aux objets qu'elles représentent. Par exemple, en imagerie mentale, le temps nécessaire pour vérifier une caractéristique d'un dessin connu dépend de la distance réelle entre le point fixé mentalement par le sujet et la caractéristique à examiner. Ainsi, quand on laisse un sujet mémoriser le dessin d'une tour et qu'on lui demande ensuite, les yeux fermés, de fixer mentalement la base de cette tour, il indiquera plus rapidement la couleur de la porte que celle du drapeau qui flotte au sommet. De la même façon, la comparaison des tailles de deux objets est d'autant plus rapide qu'elles sont différentes.

La construction d'une image mentale emprunte un canal sensoriel : elle fait appel aux souvenirs de sensations visuelles, tactiles, motrices, olfactives. Son apparition active les régions qui jouent un rôle dans la programmation des réponses motrices correspondantes et déclenchent l'activation du système neurovégétatif.

ENREGISTRER LES IMAGES MENTALES

Les techniques actuelles de mesure de l'activité du cerveau, suivi électrique des ondes cérébrales ou caméra à positions, sont impossibles à mettre en œuvre chez un sportif en mouvement. Les manifestations du système neurovégétatif sont en revanche plus accessibles. Nous avons mis au point des capteurs miniaturisés qui, posés sur la peau, enregistrent six paramètres : potentiel, résistance, irrigation sanguine et température cutanées, et fréquences instantanées cardiaque et respiratoire. Avec Karoline Delemer, Corinne Deshaumes-Molinaro, René Roure et Christian Collet, nous avons ainsi suivi, en temps réel et sans perturber le déroulement



La résistance cutanée d'un tireur au pistolet, pendant un exercice d'imagerie mentale, varie comme en situation réelle. On observe les mêmes profils caractéristiques dans les deux situations lorsque le tir est réussi (en orange) ou raté (en violet). Selon les individus, de telles similitudes, qui reflètent une activité identique du système neurovégétatif, sont observables sur différents autres paramètres : irrigation sanguine, température ou potentiel cutané, fréquences cardiaque ou respiratoire.

de l'action, la traduction neurovégétative des processus affectifs qui accompagnent le traitement cognitif du signal lors d'actions réelles et d'exercices d'imagerie mentale.

L'étude de différentes activités sportives démontre que la réponse des six paramètres du système neurovégétatif dépend de la réussite ou de l'échec du geste réalisé. La réponse du système nerveux autonome à une situation dépend de l'individu observé, de son activité et de l'organe sur lequel on effectue des mesures : chaque paramètre est plus ou moins révélateur de la réussite du geste et ce, pour chaque individu.

Comment le système neurovégétatif réagit-il lors d'un exercice d'imagerie mentale, alors qu'aucun mouvement ne se produit ? Au cours de l'épreuve de tir du pentathlon moderne, la durée du blocage respiratoire précédant le tir est du même ordre de grandeur en situation réelle et pendant l'imagerie mentale. Les athlètes les plus performants renforcent avec l'entraînement la similitude des manifestations du système nerveux autonome entre la situation réelle et l'imagerie mentale.

Ces conséquences de l'action sur le système neurovégétatif ont d'abord été découvertes pour une épreuve de tir, où le sportif doit s'isoler de son environnement. Elles viennent d'être retrouvées pour la réception du service au volley-ball, qui exige au contraire une attention soutenue à des informations extérieures. L'analyse des six paramètres du système neurovégétatif pendant toute la tâche et pendant la pratique de l'imagerie mentale correspondante permet de suivre les différentes phases de la répétition mentale.

En outre, une note a été attribuée à l'exercice d'imagerie mentale, en prenant en compte quatre critères : l'existence de réponse du système neurovégétatif, l'évolution de la vigilance au cours de la tâche, l'activité spontanée (qui indique l'anxiété situationnelle) et la concentration (appréciée par le blocage cardiorespiratoire). L'excellente corrélation de cette note avec l'amélioration de la performance démontre qu'elle caractérise effectivement la qualité de l'imagerie mentale dans diverses situations. Les sportifs disposent désormais d'un outil de suivi objectif de cet exercice, qui permettra d'améliorer le déroulement des entraînements, pour le plus grand bénéfice des performances.

Évelyne VERNET-MAURY
et André DITTMAR,
Université Lyon 1,
CNRS, UMR 5611, INSA



L'entraînement des athlètes olympiques

Les sciences du sport permettent aux athlètes de haut niveau d'améliorer leurs performances en développant leurs qualités physiologiques et mentales.



Il y a 25 siècles, Milon de Crotone avait décidé de devenir l'homme le plus fort du monde : pour s'entraîner, il faisait quotidiennement le tour d'une étable en portant un veau à bout de bras, au-dessus de la tête. Sa force augmenta avec le poids du veau, jusqu'à ce qu'il soulève une vache adulte.

Milon de Crotone, qui remporta cinq fois l'épreuve de lutte à Olympie, avait compris l'un des principes fondamentaux de la science du sport contemporaine : l'entraînement progressif, par une sollicitation des muscles à l'aide de charges croissantes, est le lot des 10 000 athlètes de 197 pays qui se rendront à Atlanta pour le centenaire des Jeux olympiques modernes.

La science du sport peut-elle aider les athlètes à mieux s'entraîner ? Depuis 50 ans, la connaissance du métabolisme humain permet d'adapter progressivement leur physiologie à la nature des performances qu'ils doivent accomplir. La force et l'endurance ne sont pas également nécessaires dans toutes les disciplines. La conduite des entraînements est ajustée pour que les compétiteurs soient au sommet de leur forme le jour des compétitions importantes.

Les spécialistes de biomécanique utilisent des ordinateurs, des caméras vidéo et des capteurs de force pour analyser les mouvements et optimiser leur coordination et leur précision. La psychologie s'allie à la physiologie pour entraîner les athlètes, car des muscles puissants ou qui résistent à la fatigue ne suffisent pas pour remporter une médaille d'or : la concentration et la motivation, tout aussi indispensables, sont

améliorées par l'entraînement mental. Ainsi les champions vont-ils toujours « plus vite, plus haut, plus fort », comme le souhaitait Pierre de Coubertin.

La majorité des sports sollicitent intensément les muscles : lors de chaque mouvement, ceux-ci se contractent et consomment de l'énergie. Celle-ci provient de la dissociation de l'adénosine triphosphate (ATP), molécule formée d'une base (l'adénine), d'un sucre (le ribose) et de trois groupes phosphate. Notre capacité de stockage musculaire de l'ATP est restreinte : quand l'effort est maximal, l'ATP disponible dans les muscles est consommée en quelques secondes seulement. Pour maintenir l'activité, le corps synthétise l'ATP de trois façons étroitement liées. La voie métabolique qu'il privilégie, à chaque instant, dépend de la puissance musculaire requise et de la durée de l'activité.

Métabolisme aérobie et anaérobie

La voie de production d'ATP qui est mise en œuvre le plus rapidement utilise la phosphocréatine, autre molécule énergétique à groupe phosphate. L'énergie libérée par la dégradation de phosphocréatine sert à la synthèse d'ATP. Cette voie ne fonctionne que pendant dix secondes au maximum, lors d'un sprint par exemple. Ensuite, le corps produit l'énergie nécessaire à la synthèse d'ATP par deux autres voies, la glycolyse anaérobie et la glycolyse aérobie.

La glycolyse anaérobie intervient en premier. Les cellules produisent de l'énergie en dégradant du glucose ou du

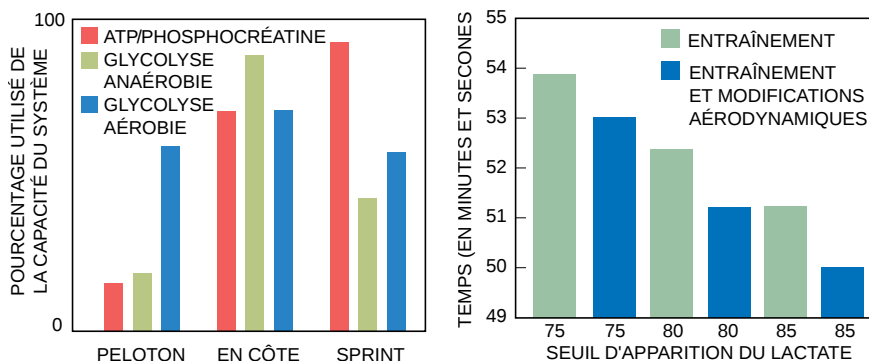
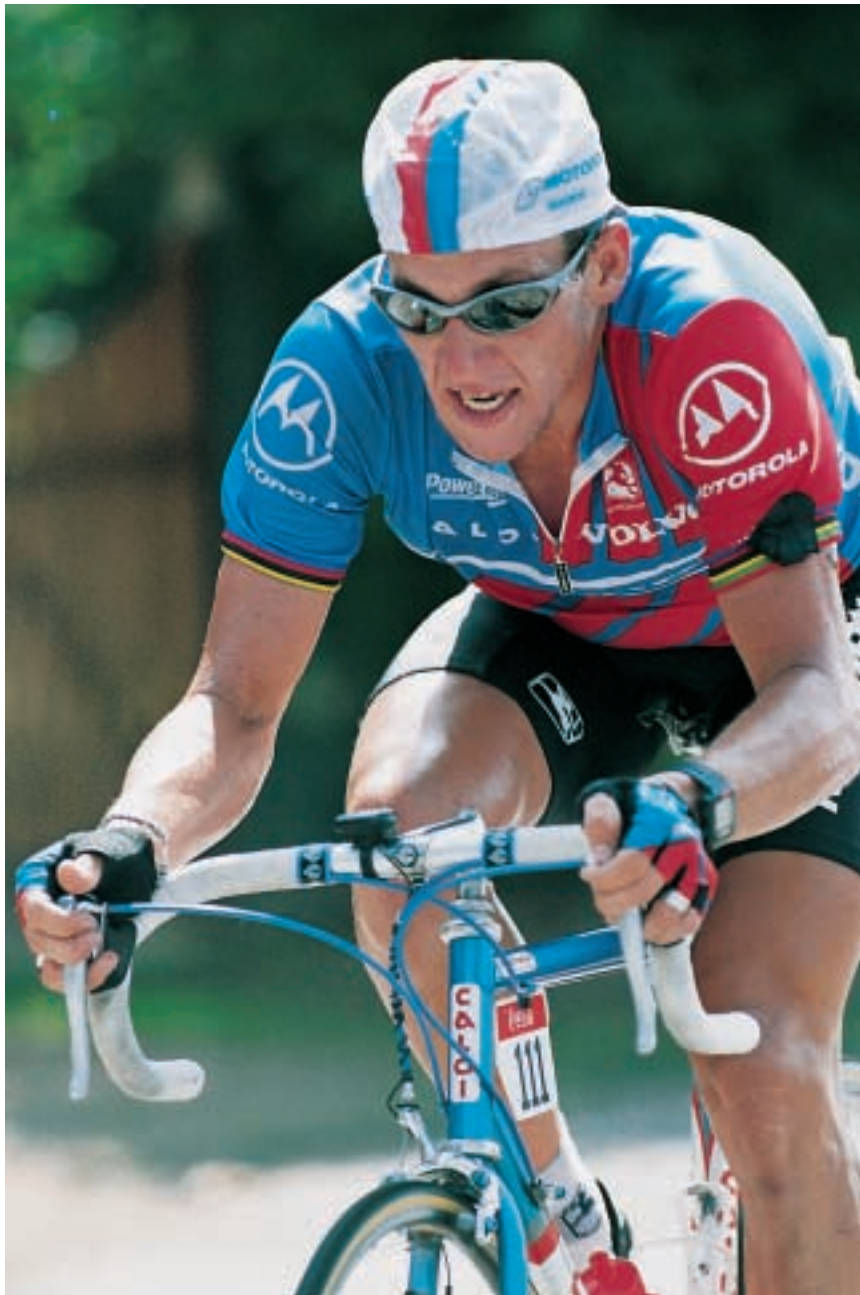
glycogène, contenus dans les muscles. Malheureusement, cette réaction produit du lactate, qui s'accumule dans les muscles et s'y transforme en acide lactique. Après quelques minutes d'effort intense, l'acide lactique provoque des sensations de brûlures musculaires.

L'entraînement habitue les muscles des athlètes à supporter de fortes concentrations en acide lactique. Toutefois l'acide lactique et le lactate finissent toujours par inhiber la contraction musculaire. Le corps ne peut donc faire appel à la glycolyse anaérobie que pour des efforts assez brefs.

Pour les épreuves d'endurance, le corps obtient de l'énergie par le métabolisme aérobie, qui est une dégradation des sucres, des graisses et des protéines en présence d'oxygène. À l'inverse du métabolisme anaérobie, la glycolyse aérobie n'est pas activée instantanément. Ce n'est qu'après une ou deux minutes d'effort intense que le rythme cardiorespiratoire assure un apport d'oxygène suffisant à la cellule musculaire. Pendant ce délai, les muscles fonctionnent grâce à l'ATP stockée ou produite par dégradation de phosphocréatine et par glycolyse anaérobie. Avec l'activation de la voie aérobie, les autres voies métaboliques fonctionnent à un niveau inférieur : de l'acide lactique et du lactate sont toujours produits, mais

1. LA COURSE DE DEMI-FOND, que pratique Marie-José Pérec, victorieuse sur 400 mètres aux Jeux olympiques de 1992, requiert puissance et vitesse. Les muscles tirent leur énergie du métabolisme anaérobie et du métabolisme aérobie, qui doivent tous deux être performants.





2. LE MÉTABOLISME DU CYCLISME varie au cours d'une épreuve sur route (à gauche). Les performances de Lance Armstrong (en haut), champion du monde sur route en 1993, ont été analysées au centre d'entraînement américain de Colorado Springs. On lui a recommandé de modifier sa position en selle, afin d'améliorer son aérodynamisme, et de s'entraîner de façon à retarder l'accumulation de l'acide lactique dans ses muscles. En suivant ces deux conseils, il a gagné près de quatre minutes sur un parcours de 40 kilomètres (en vert, les gains dus à l'entraînement seul ; en bleu, les gains dus à l'entraînement et à l'amélioration de l'aérodynamisme).

ils sont consommés par des muscles moins actifs ou métabolisés dans le foie, ce qui évite leur accumulation.

En dépit de son efficacité, le métabolisme aérobie produit de l'énergie en quantité limitée. Des besoins temporaires supplémentaires des muscles doivent être satisfaits par les autres voies de synthèse de l'ATP. Un joueur de football, au milieu d'une mi-temps de 45 minutes, tire essentiellement son énergie du métabolisme aérobie. Quand il sprinte, son corps utilise immédiatement en complément l'ATP stockée ou l'ATP produite par la voie de la phosphocréatine. Quand ce sprint se prolonge plus de 15 secondes, la glycolyse anaérobie prend le relais. Puis, ce sprint terminé, le métabolisme aérobie redevient prépondérant, tandis que les capacités des autres voies métaboliques sont régénérées.

Les entraîneurs doivent connaître les besoins énergétiques de leurs sports afin d'ajuster l'intensité ou la durée de l'entraînement de telle façon que le fonctionnement aérobie et anaérobie des athlètes soit optimal. Progressivement, l'entraînement produit des modifications physiologiques adaptées aux besoins d'un sport donné. Ainsi l'entraînement d'un coureur de fond développe-t-il les capacités d'endurance qui reposent sur le métabolisme aérobie, tandis que celui d'un haltérophile se concentre sur la force et la puissance alimentées par la voie anaérobie.

De faibles gains, mais précieux

L'entraîneur d'un athlète de haut niveau doit gérer des investissements qui semblent de moins en moins rentables : en début de carrière, 50 à 100 heures d'entraînement engendrent une amélioration de 10 à 15 pour cent des performances mais, après quelques années, 1 000 heures d'efforts intenses font parfois gagner à peine un pour cent. En revanche, le gain marginal obtenu par les entraînements d'athlètes bien entraînés rapporte gros : l'écart entre la médaille d'or et la médaille d'argent du 100 mètres messieurs n'était, aux Jeux olympiques de 1992, que de six centièmes de seconde, soit 0,6 pour cent du temps de course.

Aux Jeux olympiques d'Atlanta, l'épreuve de plus longue durée sera la course cycliste individuelle messieurs sur route, qui durera près de cinq heures. Cette épreuve de 228 kilomètres



3. TIM McRAE, de l'équipe américaine d'haltérophilie, exécute un épaulé-jeté de 130 kilogrammes. Deux caméras rapides le filment afin d'analyser son mouvement. En combinant les prises de vues des deux caméras, on obtient une image en trois dimensions (en bas).

rassemblera des concurrents dont l'entraînement sera optimisé pour un effort aérobie soutenu. Le coureur américain Lance Armstrong y remportera-t-il une médaille? Champion du monde sur route en 1993, il a gagné une étape du Tour de France en 1995, et la Flèche wallonne en 1996.

Les aptitudes de L. Armstrong se sont révélées dès son jeune âge. À 15 ans, sa capacité aérobie exceptionnelle le plaçait parmi les meilleurs athlètes mondiaux. La capacité aérobie, révélatrice des capacités cardiorespiratoires, est évaluée par la consommation maximale d'oxygène, nommée $VO_2\text{max}$ (l'oxygène est ensuite fourni aux cellules musculaires pour synthétiser l'ATP). La $VO_2\text{max}$ de L. Armstrong était de 80 millilitres d'oxygène par kilogramme de poids corporel et par minute. À 24 ans, il conserve cette $VO_2\text{max}$, qui est presque le double de la moyenne observée chez les hommes en bonne santé.

Dans le cadre de sa préparation pour les Jeux olympiques, L. Armstrong a fait plusieurs séjours au plus grand centre d'entraînement du Comité olympique américain, à Colorado Springs. Durant l'un de ses séjours, il s'est soumis à une évaluation du métabolisme sur cyclo-ergomètre, appareil qui contrôle avec précision l'effort physique (l'intensité et la vitesse de pédalage de l'athlète). Sa $VO_2\text{max}$, son rythme cardiaque et la concentration en acide lactique dans ses muscles ont été mesurés. Sa $VO_2\text{max}$ était la plus élevée de toutes celles mesurées chez les cyclistes américains. Sa puissance maximale était de 525 watts.

Les physiologistes ont aussi mesuré la vitesse d'accumulation du lactate dans ses muscles. Le seuil d'apparition de lactate est exprimé en pourcentage de la $VO_2\text{max}$ et correspond à la valeur à partir de laquelle l'accumulation du



lactate s'accélère. Chez L. Armstrong, ce seuil d'apparition de lactate était à 75 pour cent de sa $VO_2\text{max}$, soit dix pour cent de moins que la moyenne des meilleurs cyclistes américains. Aussi les entraîneurs lui ont-ils recommandé de s'entraîner plus souvent à un niveau d'effort égal ou légèrement supérieur à ce seuil, ce qui modifie les fonctions circulatoire, nerveuse et enzymatique, et repousse ainsi le seuil d'accumulation du lactate. Son seuil d'apparition de lactate est passé de 75 à 79 pour cent. L. Armstrong, qui parcourt maintenant, en entraînement ou en course, jusqu'à 40 000 kilomètres par an, contre environ 1 600 kilomètres

à 15 ans, a enregistré de meilleurs résultats lors de ses dernières courses.

Un exercice explosif

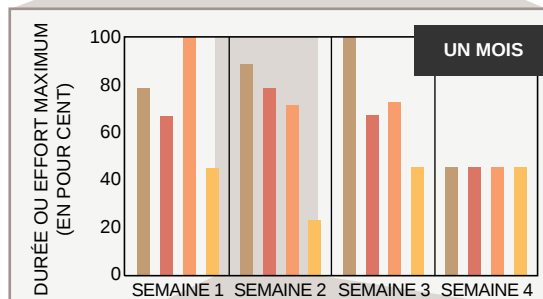
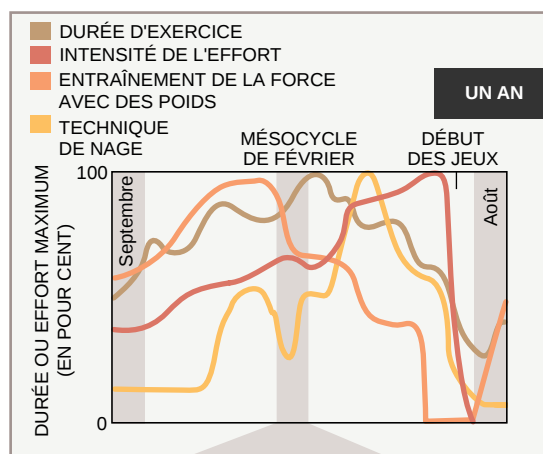
La physiologie d'un haltérophile est à l'opposé de celle d'un cycliste. L'haltérophilie est l'épreuve la plus brève des Jeux olympiques, et fait appel quasi exclusivement à la force et à la puissance musculaire. Soulever 120 à 250 kilogrammes requiert une puissance de 3 000 watts pendant une seconde. L'haltérophile puise l'énergie dans l'ATP stockée dans les muscles et dans la dégradation de la phosphocréatine. Pendant la longue période de récupération qui sépare, à l'entraînement, chaque série de cinq levers, ces réserves d'énergie se reconstituent par voie aérobie.

Tim McRae, qui souleve plus de deux fois son propre poids, a été cinq fois champion des États-Unis ; il détient les records nationaux dans trois catégories de poids pour l'arraché et l'épaulé-jeté. Dans l'arraché, l'athlète tient la barre avec les deux mains écar-

tées de deux à trois largeurs d'épaules. Il la tire d'abord jusqu'à la hauteur de la poitrine, puis s'accroupit en dessous en l'élevant au-dessus de sa tête, bras tendus ; enfin il se remet debout en maintenant la barre à bout de bras. L'épaulé-jeté se réalise avec les mains moins écartées : l'athlète amène la barre au niveau de sa poitrine et fléchit les jambes pour la stabiliser sur ses épaules avant de se relever. Après une pause, il étend complètement les bras et une puissante poussée verticale des jambes l'aide à soulever la barre.

La morphologie de T. McRae (des jambes courtes, un long torse et une belle musculature) est bien adaptée à l'haltérophilie. Sa petite taille (1,60 mètre) lui permet de soulever la barre moins haut que ses concurrents. Son aptitude physique la plus remarquable est peut-être sa détente : il saute à près d'un mètre de haut sans élan, ce qui donne une idée de la puissance des jambes que requiert l'haltérophilie.

Toutefois T. McRae ne gagnera probablement pas de médaille à Atlanta,



	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI	DIMANCHE
MATIN	ENDURANCE (AÉROBIE)	ENDURANCE (AÉROBIE)		EFFORTS AU SEUIL DE LACTATE	ENDURANCE (AÉROBIE)	EFFORTS AU SEUIL DE LACTATE	EXERCICES INDIVIDUALISÉS
MIDI	FORCE : LEVERS DE POIDS	EFFORTS INTENSES (ANAÉROBIE)	FORCE : LEVERS DE POIDS		ENDURANCE (AÉROBIE)		UNE SEMAINE
APRÈS-MIDI			COURSE DE FOND	FORCE : LEVERS DE POIDS	COURSE DE DEMI-FOND		
	15 séries de 15 coups d'aviron à 100 pour cent		sur 8 kilomètres		15 courses de 400 mètres		
	Quatre exercices de 25 minutes chacun, à un rythme cardiaque de 148 à 160 pulsations par minute		Entre trois à cinq séries de dix levers différents, répétés cinq à dix fois à 90 pour cent de l'effort maximum		Quatre exercices de dix minutes chacun, à un rythme cardiaque de 190 pulsations par minute		



4. L'ÉQUIPE AMÉRICAINE D'AVIRON, dont les sœurs McCagg (ci-dessus) sont membres, s'entraîne en suivant un programme décomposé en années, trimestres, mois, semaines et jours. La durée de l'intensité et le type d'effort sont soigneusement diversifiés, jusqu'au moment du relâchement de l'entraînement, juste avant le début des Jeux olympiques.



car les athlètes des anciens pays du bloc soviétique sont meilleurs et mieux entraînés. Les haltérophiles américains ont toutefois adopté depuis peu quelques méthodes d'entraînement de leurs concurrents : depuis cinq ans, Dragomir Cioroslan, un entraîneur d'origine roumaine qui a gagné une médaille de bronze aux Jeux olympiques de 1984, a mis en place un programme annuel très structuré, semblable à celui qu'il pratiquait en Roumanie.

Cet entraînement est organisé en périodes, qui vont des séances quotidiennes à des cycles annuels. Les capacités athlétiques et les aptitudes physiologiques sont ainsi développées de façon structurées. Les haltérophiles préparent trois ou quatre compétitions importantes dans l'année. Chacune est précédée d'un macrocycle de deux à quatre mois, lui-même décomposé en plusieurs mésocycles plus courts.

Un macrocycle débute par un mésocycle préparatoire de huit à dix semaines. Chaque semaine, les athlètes effectuent 600 efforts à 80 ou 90 pour cent de leur performance maximale. Ces séances d'entraînement, avec des efforts répétés mais d'intensité moyenne, modifient les muscles, le tissu conjonctif, les ligaments et les autres tissus mous. Ainsi ces athlètes parviennent à lever des poids plus lourds au cours du cycle d'entraînement suivant.

L'objectif du second mésocycle, qui dure quatre à cinq semaines, est le développement de la force et de la puissance ; les haltérophiles doivent effectuer moins de levers (200 à 300 par semaine), mais avec des poids plus

lourds, entre 90 et 100 pour cent de la capacité des athlètes. Le dernier mésocycle comprend deux phases qui conduisent à la compétition. Pendant la première, l'athlète travaille à une intensité maximale, afin de s'assurer que la force et la puissance acquises au cours des périodes d'entraînement précédentes se traduisent en gain de performances. La dernière semaine de ce mésocycle est une phase de récupération : la réduction du nombre et de l'intensité des exercices permet à l'athlète de récupérer des efforts de l'entraînement, sans perdre les bénéfices de sa préparation intensive.

Coordonner les mouvements

Les haltérophiles, comme d'autres sportifs, s'efforcent d'améliorer la précision de leurs gestes. L'haltérophilie est l'un des sports les plus exigeants, de ce point de vue : elle requiert une excellente coordination des mouvements. Quand les différents groupes de muscles, des extenseurs du genou et de la hanche aux muscles des épaules et des bras, ne sont pas synchronisés, l'haltérophile ne soulève pas la barre assez haut ou se balance dangereusement d'avant en arrière.

Sarah Smith, biomécanicienne au centre d'entraînement de Colorado Springs, a étudié chez T. McRae la régularité de la trajectoire en forme de S que la barre doit suivre du sol jusqu'à l'extension complète, à l'aide de deux caméras et de deux plates-formes de force qui enregistrent les forces exer-

5. TAMMY FORSTER se prépare pour l'épreuve de carabine à 50 mètres des Jeux olympiques.

cées par chaque pied. Si la charge des deux pieds diffère, l'haltérophile peut perdre la symétrie entre les deux mains : il soulève l'un des côtés de la barre plus vite que l'autre. Les asymétries lors du lever gênent la stabilisation de la barre au moment de l'arraché : cette observation a conduit à des perfectionnements techniques.

T. McRae soulève-t-il plus du double de son propre poids grâce à sa pratique précoce du sport ou grâce à ses gènes ? Selon le physiologiste Per-Olof Åstrand, pour devenir un athlète olympique, il faut bien choisir ses parents. À l'Université de Laval, au Canada, Claude Bouchard a étudié à quel point l'hérédité intervient dans les capacités des athlètes de haut niveau. Dans les années 1980, il a mené une étude sur des vrais et des faux jumeaux qui n'avaient pas d'activité sportive régulière. Certains couples de jumeaux ont doublé leur consommation maximale d'oxygène après 15 à 20 semaines d'entraînement physique, tandis que d'autres ont peu amélioré leur condition physique. Aujourd'hui C. Bouchard cherche des marqueurs génétiques qui distingueraient les individus que l'entraînement fait beaucoup progresser.

Aucun programme d'entraînement de haut niveau n'a encore sélectionné des concurrents ayant des «gènes athlétiques», mais on approche de ce type de sélection. De nombreux pays, telle l'ex-République démocratique allemande, identifiaient leurs sportifs de

haut niveau en recherchant, chez des jeunes, des caractéristiques physiques contrôlées génétiquement. Les Australiens ont montré que ces pratiques sont applicables même dans un pays qui ne contrôle pas strictement la vie de ses citoyens : la Fédération australienne d'aviron a mis au point un profil d'athlètes féminines potentiellement capables de devenir des championnes. Des critères tels que la taille, la teneur en graisses corporelles, la longueur des membres et l'endurance cardio-vasculaire ont été pris en compte, sans que les rameuses qui ne présentaient pas ces caractéristiques soient systématiquement exclues. Ce programme a produit des athlètes de niveau international en deux ans.

Si un programme de ce type existait aux États-Unis, il aurait sélectionné deux vraies jumelles, Mary et Betsy McCagg, qui sont parfaitement adaptées à leur sport. Toutes deux mesurent 1,88 mètre et pèsent 79 kilogrammes. Leur pourcentage de graisses corporelles est inférieur à la moyenne des hommes de leur âge (la majeure partie de leur poids correspond à du muscle), et leurs longues jambes facilitent l'exécution d'un coup d'aviron long et puissant.

La carrière sportive des sœurs McCagg illustre aussi que les gènes ne serviraient à rien sans un environnement favorable à la pratique du sport. Leur père, leur grand-père et de nombreux autres membres de leur famille ont pratiqué l'aviron pendant leurs études supérieures. Elles-mêmes se sont entraînées et ont disputé des compétitions à haut niveau pendant toute leur scolarité.

Elles participent aux compétitions dans les équipes de huit ou de deux où chaque membre d'équipage manœuvre un seul aviron, à deux mains. Les 2 000 mètres qu'elles parcourent en six ou sept minutes requièrent une grande puissance musculaire, une bonne capacité aérobie et une aptitude à exploiter la glycolyse anaérobie pour augmenter la puissance musculaire en fin de course.

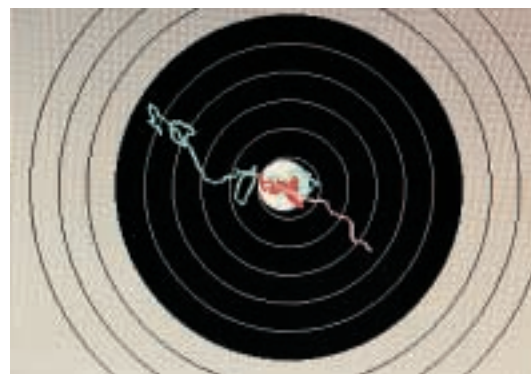
Les sœurs McCagg et les autres membres de l'équipe américaine d'aviron sont venus au centre d'entraînement de Colorado Springs, en 1991, pour une évaluation physiologique et biomécanique, afin de déterminer la cause des difficultés rencontrées au cours des 500 derniers mètres de course. Leurs entraîneurs pensaient que leurs capacités anaérobies étaient insuffisantes pour augmenter la puissance dans le sprint final. En réalité, les membres de l'équipe avaient atteint un niveau de performance anaérobie équivalent à celui des meilleurs rameurs mondiaux, mais leurs capacités aérobies étaient trop faibles : les rameuses accumulaient trop de lactate dans leurs muscles au cours des 1 500 premiers mètres de course.

Hartmut Buschbacher, ancien entraîneur de l'équipe féminine d'aviron d'Allemagne de l'Est, arriva aux États-Unis avec de nouvelles idées pour résoudre ce problème. Il mit rapidement en place un programme d'entraînement par cycles, pour un groupe de 15 rameuses soigneusement sélectionnées : des exercices d'endurance alternent avec des exercices de musculation et de puissance, afin de corriger le déficit en glycolyse aérobie. Cette stratégie a payé : le huit féminin américain a gagné le championnat du monde en 1995.

Un moral d'acier

Pour gagner aux Jeux olympiques, les athlètes doivent être en parfaite condition physique, mais ils doivent aussi se concentrer et se motiver pour réussir des performances. La psychologie du sport est née il y a presque un siècle, lorsque l'on a découvert que, dans certains sports, les performances des athlètes étaient meilleures lorsqu'ils s'affrontaient que lors des épreuves contre la montre. Dans les années 1970, Georges Rioux, de l'INSEP, et Raymond Chappuis ont introduit la psychologie du sport en France en étudiant les relations entre les joueurs dans les sports d'équipe. Les entraîneurs ont, à cette époque, commencé à appliquer tout un ensemble de techniques cognitives et comportementales, et de nouvelles recherches ont montré que l'entraînement mental améliore à lui seul les performances motrices.

Le tir est l'une des disciplines olympiques qui requiert la plus grande concentration : la force physique y est de moindre importance. Quand elle n'était âgée que de quatre ans, la tireuse Tammy Forster s'est jurée d'aller aux Jeux olympiques afin d'égaliser la gymnaste soviétique Olga Korbut, qui remporta deux médailles d'or aux Jeux de Munich. Le tir est le sport qui s'est imposé à elle parce que, dans l'arrière-cour du domicile familial, son père s'entraînait pour des compétitions de carabine ; chaque membre de la famille apprit à utiliser et à entretenir une arme. Comme l'entourage familial des sœurs McCagg, l'entourage familial de Tammy Forster était favorable : lorsque son engagement dans la haute compétition se



6. UN LASER fixé sur sa carabine permet de suivre au cours du temps la visée de Tammy Forster (ci-dessus). Elle a ainsi constaté que les ajustements successifs qu'elle réalisait étaient préjudiciables à sa précision.



7. DES CHAUSSURES SPÉCIALES assurent au tireur une bonne stabilité pour le tir en position debout.

confirma, son père suivit des cours sur la manière d'entraîner les tireurs à la carabine et devint l'un de ses entraîneurs.

À 15 ans, T. Forster s'entraînait 90 minutes par jour avec une carabine à air comprimé ou avec une 22 long rifle non chargée. Elle est un exemple qui montre qu'un entraînement intensif peut, dans certains sports, compenser un manque de dons naturels. En 1985, elle a gagné une médaille d'argent au championnat national junior et elle s'est inscrite à l'Université de Virginie-Occidentale afin de s'entraîner avec Ed Etzel, médaillé d'or aux Jeux olympiques de 1984.

En 1991, T. Forster s'est installée au centre d'entraînement de Colorado Springs. Son séjour lui a permis de consacrer tout son temps à l'entraînement pour les épreuves de carabine à 10 mètres et de carabine libre, qui consiste à tirer avec une carabine de calibre 22, sur des cibles à 50 mètres, en position couchée, à genoux et debout. Elle a particulièrement travaillé les techniques mentales de concentration, nécessaires pour exceller dans cette discipline.

T. Forster associe des exercices de relaxation musculaire, de visualisation mentale de tirs et la relation dans un journal de ses résultats et de ses émotions. Elle se fixe aussi une série d'objectifs réalistes à atteindre au cours de chaque entraînement. Les exercices de relaxation augmentent la concentration des tireurs et leur font prendre conscience de l'origine des tensions musculaires, dans les épaules et dans le dos, qui réduisent la précision de leur tir. Au cours de l'entraînement par imagerie mentale, T. Forster s'imagine en train de viser et de tirer, ou en spectatrice, en train de suivre le déroulement de l'épreuve sur la ligne de touche. Plus l'image est active, plus les performances sont augmentées par les exercices.

En compétition, T. Forster pratique l'imagerie mentale avant chaque tir. Mentalement, elle exécute lentement chaque étape, de son positionnement sur la ligne de tir jusqu'à la mise en joue. En raison de cet état de concentration et de calme qu'il faut atteindre avant chaque coup, la préparation et l'ensemble des tirs occupent les deux heures et demie autorisées pour l'épreuve de carabine libre. Le vainqueur, qui est jugé sur la précision et non sur la vitesse, atteint le centre de la cible dans plus de 90 pour cent des tirs.

T. Forster a aussi travaillé avec un psychologue du sport afin de modérer le perfectionnisme qui lui a parfois valu de perdre confiance dans sa précision. Pour évaluer sa technique, elle a utilisé une carabine équipée d'un laser à infrarouge. Une analyse de la position du faisceau sur la cible a révélé que sa visée est quasi parfaite, mais qu'elle l'ajuste sans cesse : au bout de cinq ou six secondes, elle a plus de difficultés à rester fixée sur la cible.

Elle a mis au point des routines de visualisation associées à des verbalisations qui évacuent ses craintes : par exemple, elle répète les mots «se détendre» et «prête». Son opiniâtreté a payé : durant son séjour à Colorado Springs, T. Forster a gagné deux coupes du monde et, l'année dernière, elle a fini seconde au championnat national.

Le tir n'est pas le seul sport où la tête doit venir épauler les muscles. Aujourd'hui tous les athlètes profitent des avancées de la physiologie, de la biomécanique et de la psychologie du sport. Ces sciences contribuent à faire tomber les records mondiaux. Nul ne sait jusqu'où elles permettront de repousser les limites des performances humaines.

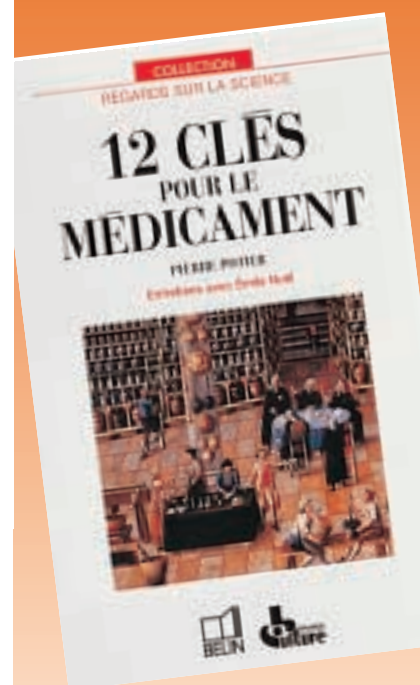
Jay KEARNEY est physiologiste du sport auprès du Comité olympique des États-Unis.

Tudor BOMPA, *Theory and Methodology of Trainings : The Key to Athletic Performance*, Kendall/Hunt Publishing, 1994.

Edgar THILL, Raymond THOMAS et José CAJA, *Manuel de l'éducation sportive*, éditions Vigot, 1994.

The Olympic Factbook : A Spectator's Guide to the Summer Games, sous la direction de Rebecca Nelson et Marie J. MacNee, Visible Ink, 1996.

Entretiens avec Émile Noël



12 CLÉS POUR LE MÉDICAMENT

La plupart des médicaments actuels sont d'origine naturelle. Découverts le plus souvent par hasard, certains sont hérités du passé, d'autres sont plus récents. La quête de nouveaux produits toujours plus efficaces et mieux tolérés reste l'un des objectifs de la recherche de pointe.

Code : 2020

215 pages – 75 F



Bon de commande en p. 98

La bicyclette idéale

Les cyclistes recherchent le compromis entre puissance, confort et aérodynamisme.

En 1924, le coureur italien Bottechia remportait le Tour de France à une vitesse moyenne d'à peine 24 kilomètres à l'heure. Près de 60 ans plus tard, en 1992, l'Espagnol Miguel Indurain a parcouru la Grande boucle de 3 983 kilomètres à plus de 39,5 kilomètres à l'heure de moyenne. Les modifications de l'entraînement, du parcours et de l'organisation de la course ont sans doute contribué à cette accélération des courses cyclistes. Depuis quelques années, ce sont toutefois les recherches sur l'aérodynamisme qui permettent aux coureurs de rouler plus vite, sur piste comme sur route.

L'italien Francesco Moser a donné en 1984 le coup d'envoi officiel de l'utilisation en compétition des études de mise au point et d'amélioration technique du vélo. Pour battre le record du monde de l'heure sur piste, il a utilisé des roues lenticulaires, plus aérodynamiques que les roues traditionnelles, dont les rayons créent des turbulences. Il a ainsi contourné le règlement qui interdit les habillages non porteurs. La position de son torse était en outre très inclinée vers l'avant pour réduire la résistance de l'air. Une autre innovation spectaculaire, qui venait rompre une tradition longuement établie, était celle du cadre

monocoque, fabriqué d'une seule pièce en matériaux composites. La rigidité de ces cadres est plus grande que celle des cadres assemblés à partir de plusieurs composants : les frictions internes absorbent moins l'énergie de propulsion fournie par le coureur. L'absence de pièces et de structures d'assemblage, sur lesquelles l'air vient buter ou qui créent des turbulences, améliore aussi l'aérodynamisme.

La résistance de l'air à l'avancement d'un cycliste croît comme le carré de la vitesse. Elle compte pour 90 pour cent dans la force totale à vaincre pour avancer. Les trois quarts de cette résistance aérodynamique sont créés par le corps du coureur : la modification de la position de celui-ci est donc le but principal des nouvelles formes de bicyclettes. Jim Martin, de l'Université du Texas, a ainsi calculé que, sur un parcours plat de 40 kilomètres, une position parfaite avec le torse bien plat permet de gagner environ huit pour cent en temps par rapport à la position classique avec le dos rond. L'utilisation d'une roue aérodynamique avec trois rayons à l'avant et d'une roue lenticulaire à l'arrière n'améliore le temps, sur le même parcours, que d'un peu moins de trois pour cent, tandis qu'un cadre aérodynamique à tubes

plats ne fait gagner que 1,5 pour cent supplémentaire environ. En outre, sur les parcours accidentés, l'utilisation d'un vélo allégé n'est pas toujours un avantage : le temps gagné dans les côtes est perdu dans les descentes si la forme du cadre oblige le coureur à adopter une position moins aérodynamique.

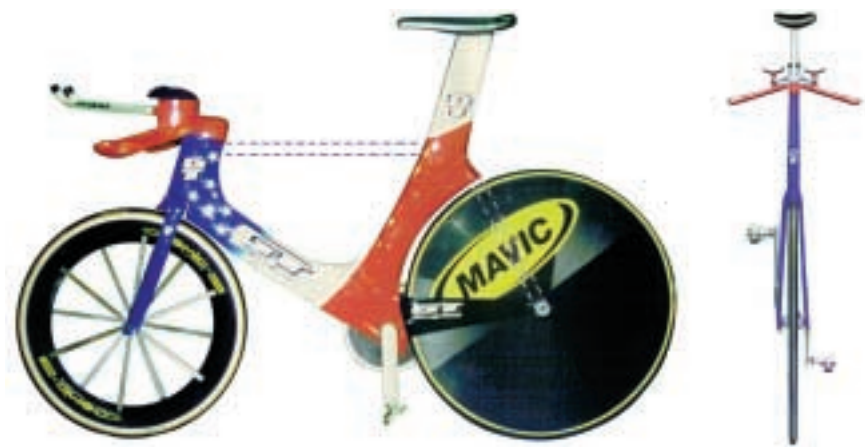
Les éléments clés d'une bonne position aérodynamique sont l'inclinaison et la courbure du torse, l'écartement des coudes et celui des genoux. Ainsi, l'écosais Graham Obree, qui n'avait jusque là réalisé aucune performance remarquable, a battu le record du monde de l'heure sur piste en 1994 grâce à une position originale. Ses épaules étaient abaissées sur ses mains et ses bras étaient collés sous sa poitrine qui reposait sur le guidon. Par rapport à une position plongeante de triathlon, cette position avancée économisait dix pour cent d'énergie.

DANS TOUTES LES POSITIONS

Pour optimiser la position des coureurs et mesurer les critères aérodynamiques et la transmission des forces, Harald Schaale, Michael Nitsch et leurs collègues qui préparent les cyclistes de l'équipe nationale allemande ont mis au point un prototype de mesure réglable qui leur permet de procéder à des expériences plus proches de la réalité que les tunnels de soufflerie et les essais conventionnels en laboratoire. La puissance moyenne déployée est mesurée en salle sur une distance de 1 000 mètres, à une vitesse de 50 kilomètres à l'heure. La répétition de cette épreuve avec différentes positions du corps fait apparaître de grands écarts dans la puissance consommée.

Le vélo de mesure est constitué d'un cadre plat, avec une fourche pour la roue arrière. Des tubes réglables permettent de modifier la distance entre les deux roues et l'écart entre la selle et le pédalier. La hauteur du guidon est en outre ajustable par la modification du diamètre de la roue avant.

Le vélo est équipé de capteurs qui mesurent la puissance fournie par le coureur, la vitesse, la fréquence de pédalage et le rythme cardiaque du coureur. Ces informations sont transmises, par induction, entre le pédalier et un microprocesseur à mémoire situé dans le cadre. La retransmission des résultats par radio permet aux entraîneurs de disposer des données en temps réel et de modifier immédiatement tel ou tel paramètre. Ce système permet notamment de mesurer les conséquences de légers déplacements de la position de la selle sur la puissance du cycliste.



Le Superbike ii, conçu aux États-Unis, a un cadre léger en fibres de carbone. Ses éléments sont profilés pour obtenir le plus grand aérodynamisme possible : petite roue avant avec des rayons en lames, roue lenticulaire à l'arrière, poignées de guidon avancées, cadre plat. La barre centrale a été éliminée (en pointillés), ainsi que la liaison entre la tige de selle et le moyeu arrière.



En 1994, le cycliste écossais Graham Obree a battu le record du monde cycliste de l'heure sur piste grâce à une position de course originale. Il était penché vers l'avant à l'extrême, les bras complè-

tement repliés le long du torse, la poitrine reposant sur le guidon. Cette position a été interdite depuis par la Fédération internationale de cyclisme.

Aucun détail n'est négligé pour gagner les quelques pour cent qui assureront la victoire. Une équipe technique du Comité olympique américain a évalué la position de pédalage de Lance Armstrong, qui participera aux Jeux d'Atlanta, pendant des compétitions et au centre d'entraînement. Outre des améliorations de sa position, telles que l'abaissement de son tronc et le resserrement de ses bras par le déplacement de sa selle, de son guidon et de la position de ses mains, une modification de la forme de son casque, lui a été proposée : une «queue» plus longue à l'arrière permet à l'air de s'écouler sans turbulences au-dessus de sa tête et dans son dos. Toutes ces améliorations ont accru la vitesse d'Armstrong de 1,44 kilomètre par heure.

La position qui correspond à la plus faible consommation de puissance n'est toutefois pas toujours celle qui convient le mieux à la course. Les angles de guidon peuvent être défavorables pour le développement de la puissance ou pour le confort (et, à terme, pour la santé) du coureur. La position plongeante du torse pour réduire la résistance de l'air est inconfortable, les genoux du coureur pilonnent le torse et sa vision est limitée. Si un

coureur peut relever la tête pendant les quelques minutes que dure une course de 4 000 mètres, cette position deviendrait intolérable pour une course sur route de 50 kilomètres. Les règlements, très stricts, ne permettent pas non plus toutes les positions. Ainsi, la Fédération internationale de cyclisme a jugé trop instable et dangereuse la position adoptée par G. Obree en 1994 et l'a interdite.

Lorsqu'un compromis a été trouvé sur la meilleure position possible, les ingénieurs doivent fabriquer la bicyclette correspondante. Ils se préoccupent de l'aérodynamisme et de l'allègement, sans sacrifier sa rigidité : la puissance de l'athlète doit être convertie en propulsion et non en déformation de la structure. Le cadre n'est pas le seul élément étudié : le guidon, les fourches, les roues ou les moyeux sont aussi importants. Ainsi, aux Jeux olympiques d'Atlanta, l'équipe américaine disposera de bicyclettes dont le diamètre et l'épaisseur des roues avant ont été réduits : la résistance au vent est plus faible et, dans les courses en équipe, les cyclistes se tiendront plus près les uns des autres afin de s'abriter mutuellement du vent.

En utilisant des matériaux composites résistants, on réduit le poids de la

structure. Des calculs par la méthode des éléments finis et des essais expérimentaux sur la résistance des matériaux sont menés en parallèle afin de déterminer les tensions locales exercées sur les différentes parties de la bicyclette et les déformations qui en découlent. Si l'on constate l'apparition de tensions inacceptables, comme un effet d'encoche qui peut se produire à la jonction d'éléments de sections très différentes, on peut changer ces sections ou renforcer le matériau à cet endroit, mais en augmentant le poids.

Ces études de haut niveau ont parfois des résultats inattendus. Alors que la plupart des vélos, depuis le siècle dernier, ont un cadre en losange, l'un des prototypes conçus par les techniciens allemands pour les prochains Jeux olympiques a un cadre en croix, plus léger. Il suffit à relier les quatre points essentiels du vélo : le roulement arrière, le pédalier, la selle et le raccord de fourche. Cette forme originale n'est toutefois pas nouvelle : en 1885, une entreprise anglaise l'avait déjà brevetée. Les matériaux disponibles à l'époque ne permettaient vraisemblablement pas de fabriquer un tel cadre avec une rigidité suffisante.



Dopage à la testostérone

Une méthode de dépistage fondée sur les concentrations en radio-isotopes.

Aujourd'hui, le dopage par les stéroïdes anabolisants administrés aux sportifs pour que leurs muscles se développent est assez facile à dépister. Toutefois, des stéroïdes anabolisants, notamment la testostérone, l'hormone mâle, sont naturellement présents dans l'organisme : comment différencier l'hormone naturelle et l'anabolisant frauduleux ? Une nouvelle méthode semble plus fiable que celle utilisée par le Comité international olympique.

Pour dépister un fraudeur, on détermine le rapport entre la concentration en testostérone et la concentration en épitestostérone, isomère de la testostérone (deux isomères ont la même formule chimique, mais la géométrie des deux molécules diffère). La testostérone et l'épitestostérone sont éliminées dans les urines.

Le Comité olympique admet qu'un rapport supérieur à six prouve que le sujet s'est dopé avec de la testostérone, mais on a trouvé des rapports compris entre six et neuf chez des sujets non dopés (la valeur moyenne est voisine de un). De surcroît, des valeurs comprises entre quatre et six, considérées comme normales, peuvent aussi correspondre à l'élimination de testostérone exogène, administrée plusieurs jours auparavant. Ainsi cette méthode ne

prouve pas formellement l'administration de testostérone.

Afin de pallier ces inconvénients, nous avons mis au point une méthode fondée sur la spectrométrie de masse isotopique, où l'on détermine le rapport des concentrations en carbone 12 (^{12}C) et en un de ses isotopes, le carbone 13 (^{13}C). Cette méthode précise l'origine de la testostérone urinaire : naturelle ou endogène, d'une part, synthétique ou exogène, d'autre part. Pourquoi le carbone est-il un marqueur de l'origine de la testostérone ? La testostérone naturelle humaine est biosynthétisée à partir du cholestérol, lequel a deux origines : il est présent dans certains aliments, mais est aussi synthétisé par l'organisme. Au contraire, la testostérone exogène est obtenue par voie chimique à partir de stéroïdes végétaux.

DES RAPPORTS DIFFÉRENTS

Le carbone contenu dans les plantes a pour origine le dioxyde de carbone atmosphérique fixé lors de la photosynthèse. Deux mécanismes de fixation du dioxyde de carbone existent, de sorte que, selon le type de plante, l'enrichissement en ^{13}C change. Le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans

les stéroïdes végétaux utilisés pour la synthèse de la testostérone est différent du rapport qui caractérise les molécules biosynthétisées par l'homme à partir de l'alimentation.

Par cette méthode, on analyse le dioxyde de carbone, CO_2 , formé par la combustion de la molécule étudiée ; on obtient diverses molécules issues de la combinaison des isotopes du carbone ^{12}C et ^{13}C , et des isotopes de l'oxygène ^{16}O , ^{17}O et ^{18}O , et l'on détermine l'abon-

dance relative de chacune de ces formes de dioxyde de carbone. Un logiciel traite les données et fournit directement les valeurs du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Cette méthode de détection donne des dosages indiscutables de la testostérone endogène et de la testostérone exogène ; elle n'est pas toujours en accord avec les résultats fournis par le rapport testostérone/épitestostérone, préconisé par le Comité olympique. Ainsi, nous avons décelé de la testostérone exogène dans des urines dont le rapport était inférieur à six, et de la testostérone naturelle pour des urines dont ce rapport était supérieur à six.

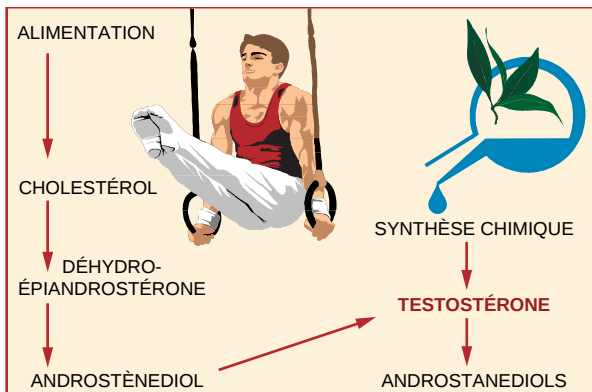
Il nous reste à préciser le rôle de l'alimentation dans les résultats obtenus. La nature de l'alimentation influe notablement sur la valeur du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ des stéroïdes, mais cela ne devrait pas fausser les résultats : l'analyse isotopique est réalisée tant sur la testostérone elle-même que sur ses précurseurs (le cholestérol, la déhydroépiandrosterone) et sur ses métabolites, notamment les androsténoles. En comparant les rapports isotopiques obtenus pour ces différentes étapes, on détecte aisément toute variation notable du rapport, laquelle signe un apport exogène de testostérone. Les stéroïdes précurseurs servent, en quelque sorte, d'«étalons internes», propres à chaque personne.

Cette méthode exige un matériel plus onéreux que le simple dosage effectué jusqu'à présent, mais elle serait particulièrement adaptée à la confirmation des résultats ambigus obtenus par la mesure des rapports testostérone sur épitestostérone lors des compétitions sportives. Une trentaine de millilitres d'urine suffisent à l'analyse.

Michel BECCHI
CNRS - Service central d'analyse



Ben Johnson a été privé de sa médaille d'or aux Jeux olympiques de Séoul, en 1988, pour dopage aux stéroïdes anabolisants.



La testostérone dosée dans les urines peut être l'hormone mâle endogène provenant du cholestérol, lui-même issu de l'alimentation. Elle peut aussi être d'origine exogène : la testostérone de synthèse ne se distingue de la testostérone endogène que par sa composition en carbone 12 et en carbone 13.