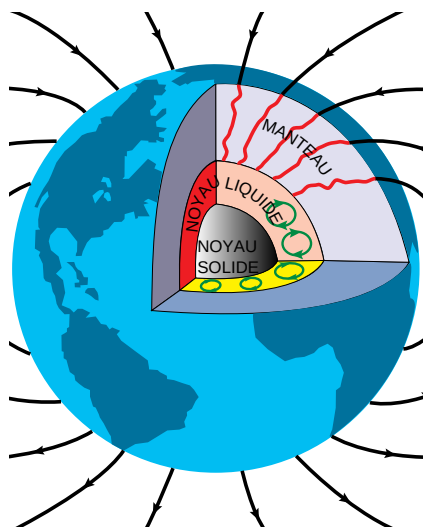


«Voir» le noyau

Le manteau terrestre est très transparent au champ magnétique produit dans le noyau.

Le champ magnétique mesuré à la surface de la Terre reflète-t-il le champ créé dans le noyau ? Grâce à l'étude des enregistrements magnétiques obtenus depuis une cinquantaine d'années, nous avons montré que le manteau terrestre est un bon isolant électrique : il est donc très «transparent» aux signaux magnétiques, ce qui confirme le fait que nous sommes en mesure de voir «en direct» ce qu'il se passe à la surface du noyau.

Parce que, jusqu'à aujourd'hui, aucun forage n'a dépassé 15 kilomètres de profondeur, nous n'avons accès qu'à des informations indirectes sur la Terre profonde, fournies par la sismologie, la géodésie ou la géochimie. L'exploitation combinée de ces informations indique qu'à la suite de sa formation la Terre s'est différenciée en un manteau de silicate et un noyau de fer et de nickel liquide. Le refroidissement de cet alliage fait lentement croître une graine solide et engendre des mouvements de convection dans le liquide. Ces mouvements d'un liquide conducteur électrique à travers le champ magnétique



Le champ magnétique de la Terre est engendré à l'intérieur du noyau liquide par les mouvements du fer. L'altération de certains signaux magnétiques par le manteau terrestre permet de mesurer sa conductivité électrique.

terrestre induit un courant électrique qui permet d'entretenir ce champ magnétique, extraordinaire témoin de la dynamique terrestre.

Avant de parvenir à la surface de la Terre, le champ magnétique est altéré par la traversée du manteau, faiblement conducteur. En régime variable, le champ magnétique et le champ électrique sont couplés : une variation du champ magnétique dans le manteau fait donc apparaître un champ électrique. Dans le manteau conducteur, ce champ électrique induit un courant électrique qui crée à son tour un champ magnétique, qui s'ajoute au champ initial. Pour apprécier l'importance de cette altération du champ magnétique, il est essentiel d'estimer la conductivité électrique du manteau.

On mesure, en laboratoire, la conductivité électrique du silicate du manteau à très hautes pression et température (plusieurs dizaines de milliers d'atmosphères, 400 °C). Le comportement semi-conducteur des silicates permet alors d'extrapoler les mesures aux conditions du manteau profond (100 000 atmosphères, 2 000 à 3 000 °C). C'est ainsi qu'une autre équipe de notre Institut avait déjà estimé une conductivité électrique d'environ 10 siemens par mètre pour le manteau profond, 10 000 fois inférieure à celle du fer.

Avec des collègues de l'Université de Rennes, nous avons maintenant estimé cette conductivité en étudiant directement la façon dont le manteau déforme un signal magnétique qui provient du noyau. Nous avons exploité le fait que le champ principal présente à intervalles irréguliers de brusques changements de tendance, les «secousses magnétiques». Reprenant 50 années d'observations magnétiques, nous avons caractérisé la secousse magnétique qui se produisit en 1970 : celle-ci peut être décrite presque parfaitement au moyen de ce que les mathématiciens nomment une singularité (l'apparition d'un pic ou d'une marche dans un signal sont des exemples de singularités, la secousse magnétique étant d'une nature un peu différente). Comme la conductivité du manteau ne pouvait qu'atténuer ces signaux et non les engendrer, la secousse a été créée dans le noyau. Nous avons alors mesuré le champ parasite résultant qui correspond à l'écart, par rapport à une singularité parfaite, de la secousse magnétique observée. Cela nous a permis d'estimer une conductivité moyenne pour le manteau inférieur (15 siemens par mètre), en remarquable accord avec la valeur obtenue en laboratoire.

M. ALEXANDRESCU et G. HULOT,
Institut de Physique du Globe de Paris

Poumon et fluor

Des liquides fluorés pour soigner les poumons.

Les sociétés pharmaceutiques Alliance Pharmaceutical et Hoechst Marion Roussel s'allient pour mettre au point un nouveau traitement des syndromes de détresse respiratoire. Pourquoi cet intérêt ? L'histoire commence en 1966, quand Leland Clark plonge un rat dans un fluorocarbure liquide (dont les molécules sont composées d'atomes de carbone, d'hydrogène et de fluor), saturé d'oxygène : l'animal survit, parce qu'il trouve dans le liquide assez d'oxygène pour respirer : l'acte de respirer, c'est-à-dire de gonfler les poumons, ne sert qu'à y faire entrer de l'air, enrichi en oxygène, puis à faire sortir de l'air chargé de dioxyde de carbone. Les absorptions d'oxygène et les rejets de dioxyde de carbone, au contact des alvéoles pulmonaires, sont des diffusions de molécules sans relation avec l'acte mécanique de la respiration. Or le fluorocarbure utilisé était inerte, bon solvant des gaz respiratoires, et il s'étalait bien sur les alvéoles pulmonaires, ce qui facilitait les échanges des gaz dissous en grande quantité.

Pendant que diverses équipes cherchaient à utiliser les composés fluorés afin d'obtenir du «sang artificiel», quelques équipes cherchaient à utiliser des fluorocarbures pour véhiculer des médicaments jusqu'aux alvéoles pulmonaires. Comme de nombreux médicaments ne sont pas solubles dans les fluorocarbures, Jean Riess, Marie-Pierre Krafft et Véronique Sadtler, à Nice, ont cherché des émulsions inverses, où l'eau est dispersée dans le fluorocarbure sous la forme de gouttelettes séparées par des molécules tensioactives, avec une extrémité soluble dans l'eau et une extrémité soluble dans le fluorocarbure.

De telles émulsions inverses stables ont été obtenues en mars 1996, grâce à des molécules tensioactives composées d'une longue chaîne constituée seulement d'atomes de carbone et de fluor, liée à une partie rendue très soluble dans l'eau par l'association d'atomes d'oxygène, d'azote et de phosphore. Diverses substances actives (antibiotiques, bronchodilatateurs, corticostéroïdes, agents mucolytiques ou anticancéreux) y ont déjà été incorporées. Les émulsions inverses formées sont aujourd'hui évaluées chez l'animal. □

Sacs gonflables

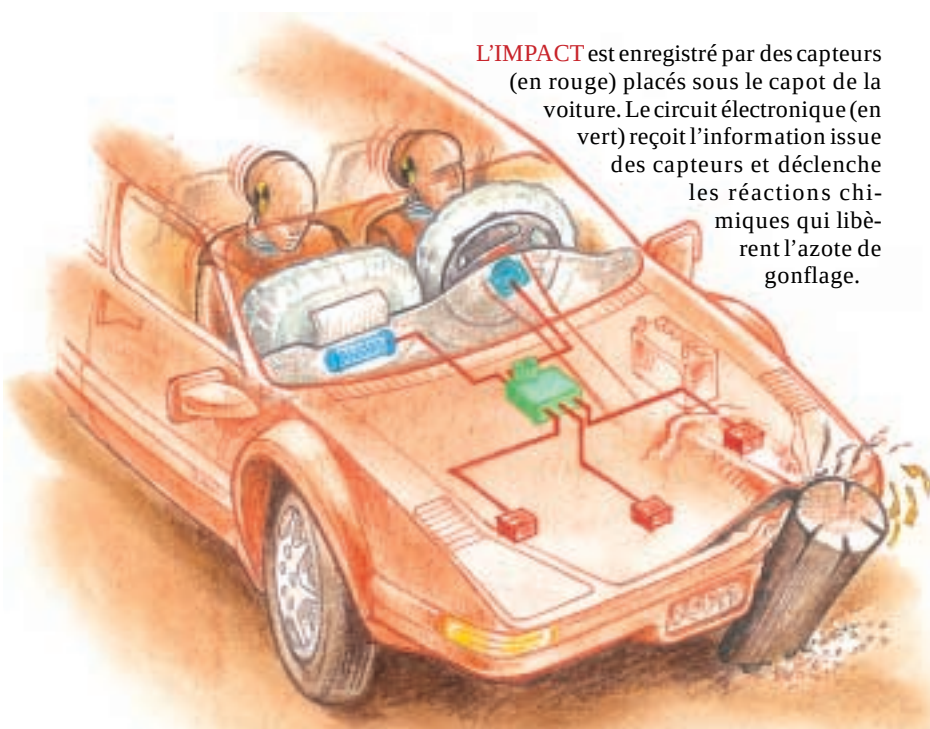
ROBERT RESH

L'idée de protéger les automobilistes des chocs par un coussin gonflable date de la Seconde guerre mondiale. Un premier brevet américain porte sur un «dispositif gonflable pour les atterrissages brutaux».

Les sacs gonflables (*air-bags*) des automobiles incorporent de multiples composants mis au point pendant les vingt dernières années. Toutefois les premiers dispositifs étaient peu fiables et coûteux. La principale difficulté portait sur le stockage et la libération du gaz comprimé. Y avait-il assez de place pour une capsule de gaz comprimé? Pouvait-on maintenir le gaz sous pression pendant toute la durée de vie de la voiture? Comment faire pour qu'il se dilate très vite? Comment assurer une grande fiabilité à toutes températures? Et surtout comment éviter que le bruit de la détonation n'assourdisse les passagers?

La solution est apparue dans les années 1970 : les dispositifs de gonflage à propulseurs solides. Une réaction chimique libère de l'azote chaud dans le sac. Ces dispositifs ont été commercialisés dans les années 1980 sur les voitures de sport américaines.

Aux États-Unis, on évalue à 600 le nombre de vies préservées grâce à ces sacs gonflables, et ce nombre augmentera à mesure qu'un plus grand nombre d'automobiles seront équipées. Les ingénieurs poursuivent les recherches sur des appareils réutilisables, plus petits et assurant une meilleure protection.



L'IMPACT est enregistré par des capteurs (en rouge) placés sous le capot de la voiture. Le circuit électronique (en vert) reçoit l'information issue des capteurs et déclenche les réactions chimiques qui libèrent l'azote de gonflage.

LES CAPTEURS utilisent soit un interrupteur mécanique qui se ferme quand le déplacement d'une masse établit un contact ou un interrupteur électronique déclenché par un petit accéléromètre disposé sur une puce.

MÉCANIQUE



ÉLECTRONIQUE



25 MILLISECONDES



30 MILLISECONDES



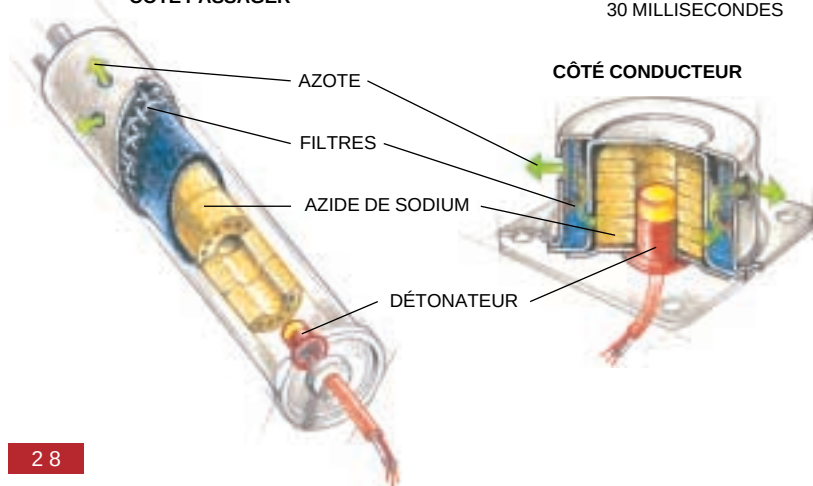
40 MILLISECONDES



55 MILLISECONDES

CÔTÉ PASSAGER

CÔTÉ CONDUCTEUR



LES GONFLEURS sont constitués d'un détonateur qui enflamme des grains d'azide de sodium et d'oxydant. Ces éléments brûlent dans la boîte métallique produisant une bouffée d'azote chaud. Les particules d'oxyde de sodium sont arrêtées par un filtre. Les dispositifs sont cylindriques du côté passager et en forme de disque du côté conducteur pour tenir au centre du volant.



L'alliance du sport et de la science est pourtant fructueuse pour les deux partenaires. Les pages suivantes en donnent un aperçu : les sportifs bénéficient des progrès scientifiques, et la science apprend beaucoup en observant les sportifs, de tous niveaux. Les diverses activités sportives offrent un champ d'expérimentation original pour de nombreuses disciplines scientifiques et sont un terrain privilégié d'interdisciplinarité.

LE SPORT
ET LA SCIENCE
SONT-ILS
COMPATIBLES?

Aveuglés par la futilité du sport, les chercheurs des sciences «sérieuses» ont peur de se fourvoyer, par une médiatisation qui les cantonnerait dans un domaine non reconnu par leurs confrères. Ils ont l'impression que les recherches sur le sport, dirigées uniquement vers les applications, interdiraient toute avancée des connaissances fondamentales. Du côté des sportifs, entraîneurs et pratiquants, la recherche, parce que mal connue, est souvent perçue comme une perte de temps. Dans bien des cas, le scientifique apparaît comme un concurrent avec lequel on doit partager le pouvoir. Un certain obscurantisme fait même conclure parfois que la science serait préjudiciable à l'entraînement et aux résultats en compétition.

La science étudie surtout des phénomènes reproductibles, créés ou simplement observés. Pour comparer des événements, afin d'en déduire les mécanismes ou de vérifier des hypothèses, les chercheurs mesurent ou règlent le plus précisément possible les paramètres importants. Les sports, grâce aux règles qui les codifient, simplifient et normalisent des activités humaines, qu'elles permettent ainsi d'étudier. Une série de courses de 100 mètres constitue une série d'expériences comparables entre elles : le départ est toujours donné de la même façon, la piste a toujours la même forme, la vitesse du vent est mesurée et la distance parcourue est toujours la même. Les recherches sur la coordination des mouvements, la physiologie de l'effort, l'activité musculaire ou l'élasticité des sols y trouvent de précieuses données.

SPORT ET SCIENCE : UNE ALLIANCE CONTRE NATURE?

En outre, la pratique du sport crée des situations extrêmes, physiques, psychologiques ou sociales, plus difficilement accessibles dans d'autres conditions. Des individus soumettent leur corps à des exercices intenses qui les transforment ; on peut créer, afin d'en comprendre les mécanismes, des situations de stress ou de coopération dans des équipes ; la fiabilité de matériaux nouveaux est éprouvée par les fortes contraintes de la compétition.

Comment, en retour, la science profite-t-elle aux sportifs ? Les scientifiques qui comprennent mieux la mécanique du corps humain au cours d'un saut à la perche, l'acquisition des gestes de l'expert en escalade, les mécanismes de l'imagerie mentale ou l'aérodynamisme des coureurs cyclistes autorisent de meilleures pratiques sportives. La recherche fait progresser le sport en améliorant la compréhension de ce qu'il est, et en accroissant le plaisir et le confort de tous les sportifs amateurs, qu'ils essaient de battre leur record personnel au marathon, qu'ils jouent au rugby tous les dimanches entre amis ou qu'ils nagent occasionnellement pendant l'été. La progression des records n'est qu'une conséquence, somme toute mineure.

ROGER BAMBUCK, président du Groupe de recherches sur le sport du CNRS, ancien ministre.



Le mythe olympique

Le sport moderne est né à Rome.

La flamme olympique qui brillera à Atlanta du 19 juillet au 4 août prochains a été indûment allumée à Olympie : si le Comité international olympique était fidèle à l'histoire, cette flamme viendrait de Rome. Contrairement à la légende créée par Pierre de Coubertin, fondateur des Jeux olympiques modernes, les précédents antiques au sport contemporain sont en effet plus romains que grecs. C'est seulement à Rome que l'on trouve la conception du sport-spectacle et le rôle parfois démesuré de l'argent dans les compétitions. C'est aussi à Rome que l'on constate l'existence d'organisations structurées semblables à nos grands clubs de football, les factions, qui se distinguaient par leurs couleurs : les Bleus, les Verts, les Blancs et les Rouges. On y criait déjà «Allez les Verts!» (ou plutôt «*præsini felicitare*») des siècles avant que les supporters du club de football de Saint-

Étienne ne reprennent la formule. Les nombreuses sources littéraires, iconographiques et épigraphiques nous informent en détail de ces pratiques.

Les jeux du cirque (*ludi circenses*) ne sont pas les combats de gladiateurs (*munera*) ni les chrétiens jetés aux lions : ce sont, pour l'essentiel, des compétitions hippiques et athlétiques. Elles se disputent dans un édifice approprié, le cirque. Le plus connu est le Grand Cirque de Rome, Circus Maximus, situé dans une vallée, entre les collines du Palatin et de l'Aventin, où auraient été enlevées les Sabines, sous le règne du fondateur, Romulus. Au début de notre ère, sous le règne d'Auguste, le Grand Cirque, de 620 mètres de long et 180 mètres de large, pouvait accueillir 150 000 spectateurs au moins : c'était, jusqu'à l'époque contemporaine, le plus grand édifice de spectacle du monde (la France n'a toujours pas de stade de

100 000 places). Le stade d'Olympie, en revanche, n'a jamais été équipé de gradins pour les spectateurs : on mesure, sur ce critère, la différence de mentalité entre les deux sociétés antiques.

Étant donné la taille de ces monuments et les dépenses nécessaires à leur construction, quelques cirques seulement ont été construits en Gaule romaine, dans les plus grandes villes. À Lyon, on connaît une très belle mosaïque illustrant les jeux du cirque ; à Vienne, la «Pyramide», toujours en place, ornait le mur-barrière situé dans l'axe de l'arène, autour duquel tournaient chars et chevaux. Le cirque d'Arles, édifié au II^e siècle de notre ère sur les bords du Rhône, a été en partie dégagé lors de fouilles récentes. Il est long de 450 mètres, et ses gradins sont entièrement construits sur pilotis de chêne et de pin.



L'un des pugilistes saigne abondamment au cours de ce violent combat de boxe. L'arbitre tient une baguette qui lui sert à séparer les combattants. Cette scène figure sur le pavement du IV^e siècle d'un petit établissement thermal situé près de Gafsa, en Tunisie.

Les pieux de chêne, plus résistants, sont disposés aux endroits qui supportaient les plus lourdes charges.

LES CLUBS S'ARRACHENT LES VEDETTES

Les courses de chars sont la compétition reine. La plus prisée est la course de quadriges : les chars sont tirés par quatre chevaux, deux attelés sous le joug à un timon et les deux autres reliés à la caisse du char par une simple courroie. Ce sont des courses de galop : le film *Ben Hur* retrace avec une certaine justesse cette épreuve endiablée, qui se déroulait sur sept tours (environ cinq kilomètres). Le cocher, debout sur son char, a les guides nouées autour de la taille : cette technique, qui laisse les mains libres, est dangereuse en cas de chute. Elle a été empruntée aux Étrusques dès le VII^e siècle avant notre ère, comme bien d'autres aspects des jeux romains.

Les meilleurs cochers étaient des vedettes : souvent esclaves au début de leur carrière, ils gagnaient ensuite des sommes fabuleuses et se faisaient parfois transférer d'une faction à l'autre, contre compensation. Des inscriptions sur pierre relatent leurs exploits avec un luxe de détails.

Des documents iconographiques, fresques ou mosaïques, soulignent que, de l'époque des rois étrusques jusqu'à l'Antiquité tardive, les Romains ont aussi



Le vainqueur d'épreuves athlétiques (*nu, au centre*) est récompensé par une palme et, vraisemblablement, par une couronne dont le coiffent les deux personnages qui l'entourent. Cette scène provient de la même mosaïque que celle de la page précédente.

apprécié des spectacles de jeux athlétiques. Les sports de combat, surtout le terrible pugilat, qui se pratiquait parfois avec des «gants» (les cestés) munis de pointes, étaient parmi les spectacles favoris des Romains. La mosaïque en noir et blanc qui couvrait le sol du vestiaire des thermes de Porta Marina, à Ostie, au début du II^e siècle de notre ère, montre divers athlètes professionnels (boxeurs, lutteurs, discobole, sauteur en lon-

gueur...), et même un ballon que l'on pourrait croire fabriqué pour la récente Coupe d'Europe de football. Le somptueux «tapis» du début du IV^e siècle, découvert récemment près de Gafsa, en Tunisie, est décoré de nombreux athlètes, répartis sur quatre registres : coureurs à pied, sauteur en longueur, discobole, lutteurs, boxeurs et pancratiastes (à la fois boxeurs et lutteurs). Des prix, qui ne sont pas seulement honorifiques, comme l'indique la présence de sacs d'argent, attendent les vainqueurs.

À Rome, le sport n'est pas réservé aux professionnels : de nombreux citoyens romains se livraient à divers exercices physiques tels que le jeu de balle ou même le cerceau. Le Champ de Mars, vaste plaine située au Nord-Ouest du Capitole, devait ressembler à notre Bois de Boulogne un dimanche matin. Les thermes disposaient aussi d'installations adéquates pour les sportifs, qui pouvaient ensuite se décrasser et se baigner.

Dans le domaine sportif, le «gréco-centrisme» est un écueil. L'influence étrusque a, par exemple, été plus grande sur Rome que l'influence grecque : les fresques funéraires étrusques, telles celles de la tombe des Olympiades, mises au jour à Tarquinia dans ces dernières décennies, en sont la preuve éclatante. L'histoire du sport a d'ailleurs commencé il y a près de 5 000 ans, à Sumer et en Égypte, bien avant les Jeux olympiques.

Jean-Paul THUILLIER
École normale supérieure, Paris



Sur la mosaïque des thermes de Porta Marina, au milieu d'athlètes qui s'entraînent, un «ballon» a une allure contemporaine (*au centre*).

Jean-Paul THUILLIER, *Le sport dans la Rome antique*, éditions Errance, 1996.

Le saut à la perche

Pour évaluer les performances, les mécaniciens filment les perchistes.

Au saut à la perche, après une course d'élan, on plante une perche dans un butoir. L'appui sur la perche flexible transforme alors le mouvement horizontal du perchiste en un mouvement vertical. Pourquoi le perchiste ukrainien Sergueï Bubka est-il le seul perchiste au monde à franchir 6,10 mètres ? Cet exploit aurait été inimaginable sans la flexibilité des perches en fibre de verre. Afin d'améliorer encore

les perches de saut et pour comprendre quels sont les facteurs de la performance, nous mesurons, à l'aide de dynamomètres, les forces exercées sur la perche, et analysons le mouvement des perchistes avec des caméras. Ainsi, nous avons corrélé la position du sauteur et les forces exercées lors des différentes phases du saut.

Pour l'analyse des forces, on recourt à deux dynamomètres. Le premier, placé

sous le butoir, mesure l'évolution des efforts (selon trois axes de coordonnées perpendiculaires) développés par le système formé par la perche et le perchiste sur le butoir au cours du saut. Le second, incorporé dans la piste d'élan, détermine la force exercée par le perchiste sur la piste lors du dernier appui avant le décollage.

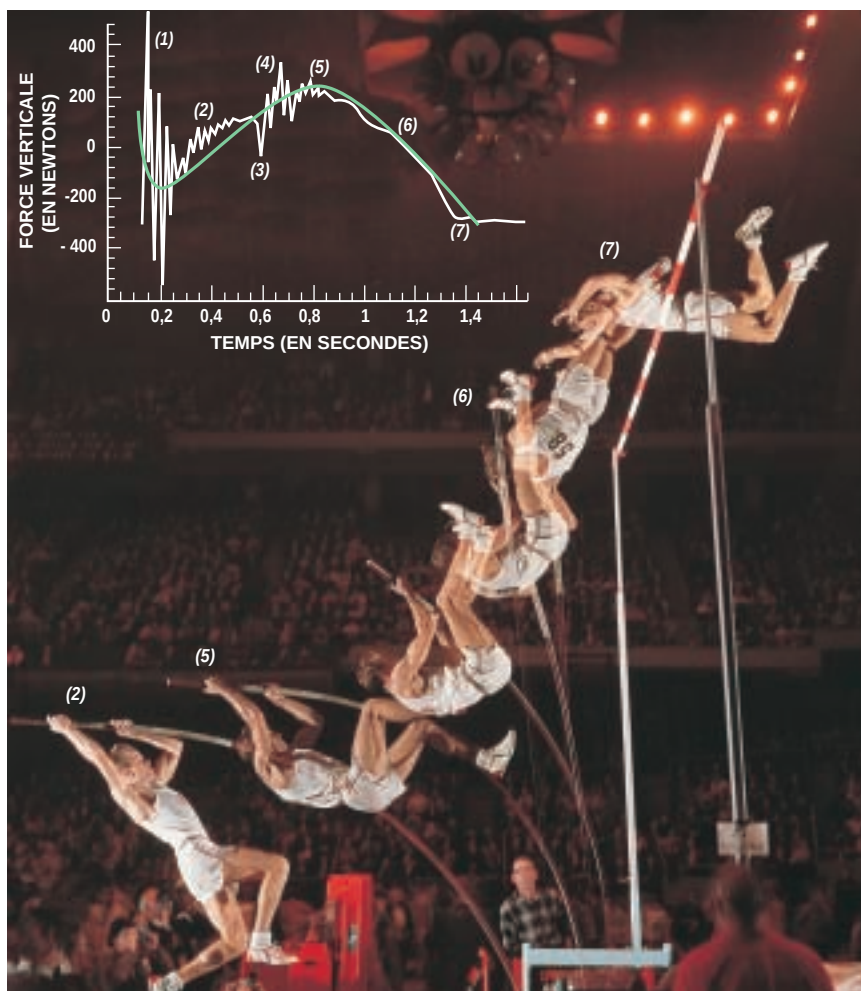
L'analyse de la position est assurée par quatre caméras qui enregistrent les trajectoires tridimensionnelles de chaque articulation du perchiste et de certains points de la perche. En utilisant ces trajectoires, nous avons reconstitué, au cours du saut, le déplacement, la vitesse et l'accélération du centre de gravité du sauteur, ainsi que celui du système perche-perchiste selon trois axes. En outre, l'analyse vidéo a permis de calculer le moment cinétique du sauteur (qui traduit la rotation du corps) et son énergie cinétique.

LES FORCES ET L'ENREGISTREMENT VIDÉO

La cinématique est plus riche que la dynamique : la relation fondamentale de la dynamique indique que la somme des forces exercées sur un système est égale à sa masse multipliée par son accélération. L'analyse des images vidéo permet de trouver, par deux dérivations temporelles successives de la trajectoire, l'accélération du système formé par la perche et le perchiste, d'où l'on déduit la force appliquée dans le butoir. En revanche, si, par deux intégrations temporelles successives de cette force, on calcule la trajectoire du centre de masse perche-perchiste, on ne peut connaître les positions relatives des différentes parties du corps. Comme la fréquence d'acquisition des dynamomètres (3 000 hertz) est supérieure à celle des caméras (50 hertz), les deux approches sont nécessaires. De surcroît, la dynamique fournit des résultats en temps réel, tandis que l'analyse de la cinématique requiert plusieurs heures de dépouillements et de calculs.

Pour la première fois, nous avons montré que la force calculée par les simulations numériques à partir de l'analyse des images vidéo était semblable à celle mesurée avec le dynamomètre (voir la figure). Ce résultat, qui montre la fiabilité des modélisations fondées sur l'analyse de la dynamique, est la première étape d'une simulation, laquelle, en intégrant l'ensemble des paramètres mécaniques mesurés ou calculés, permettra un entraînement assisté par ordinateur.

J. MORLIER, M. CID, A. GÉRARD
CNRS, URA 867, GDR Sport
Université de Bordeaux 1



La composante verticale de la force appliquée dans le butoir (courbe blanche) permet de caractériser les différentes phases du saut. Le perchiste plante sa perche (1), puis la perche s'infléchit et le perchiste groupe ses membres (2). La perche glisse dans le butoir (3) et se bloque au fond du butoir (4). La perche est à son maximum de flexion (5), le perchiste se redresse, se renverse (6) et lâche finalement la perche (7). Cette force est comparée à celle calculée à partir des images vidéo (courbe verte).

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