

# Le saut à la perche

*Pour évaluer les performances, les mécaniciens filment les perchistes.*

**A**u 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.

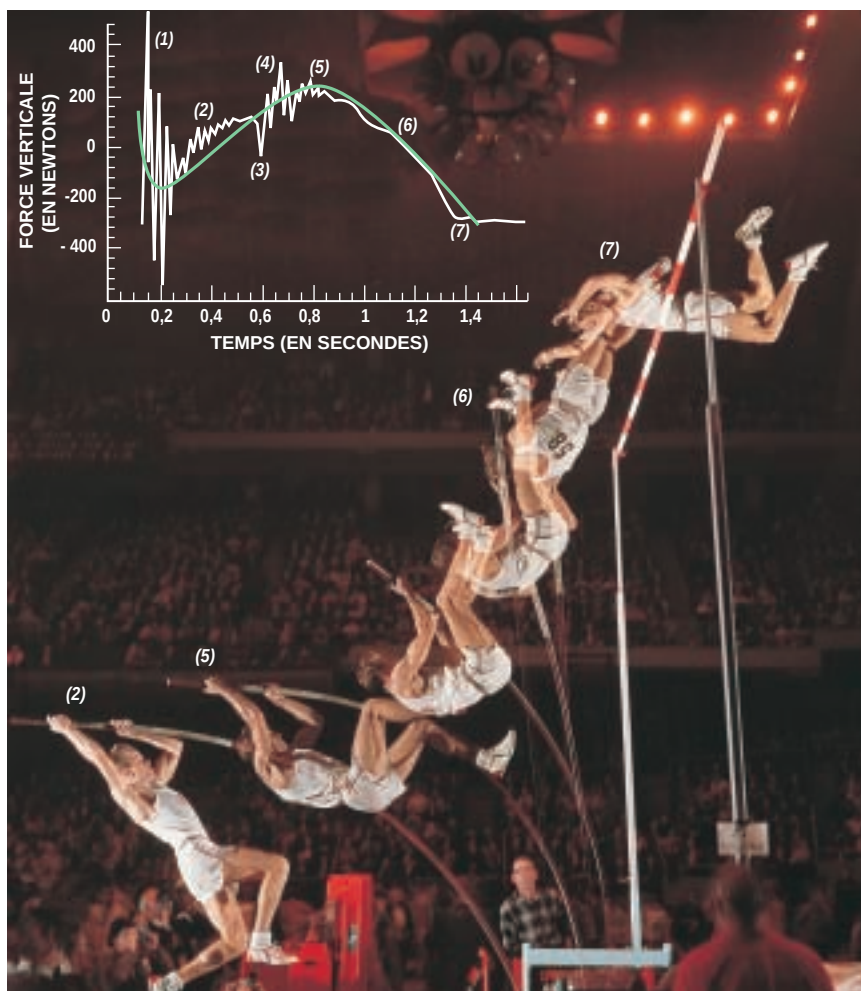
L'analyse de la position est assurée par quatre caméras qui enregistrent les trajectoires tridimensionnelles de chaque articulation du perchiste et de certains points de la perche. En utilisant ces trajectoires, nous avons reconstitué, au cours du saut, le déplacement, la vitesse et l'accélération du 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

# 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<sup>e</sup> 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

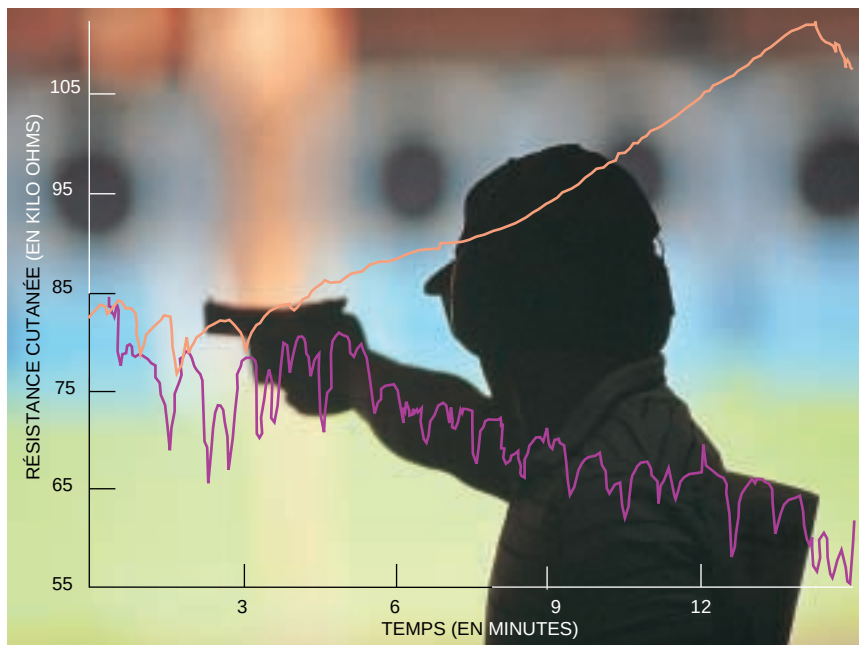


pard, à Stanford, et de Stephen Kosslyn, à Harvard, ont montré que les images sont, sous certains aspects, analogues aux objets qu'elles représentent. Par exemple, en imagerie mentale, le temps nécessaire pour vérifier une caractéristique d'un dessin connu dépend de la distance réelle entre le point 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.