

Au service de la dissection du geste

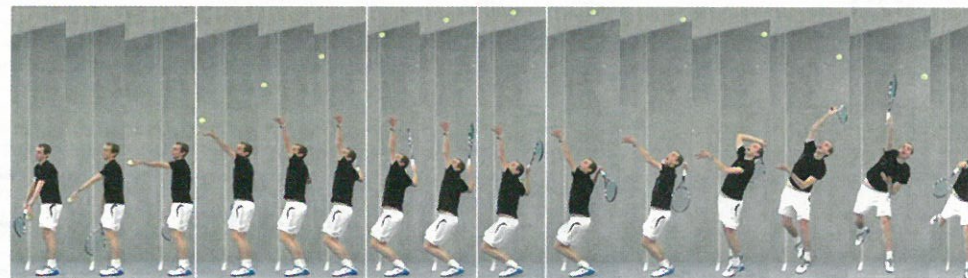
ANALYSE DU MOUVEMENT Techniques optoélectroniques et vidéo, plateformes de force, électromyographie de surface... : l'analyse du mouvement humain exige des technologies de pointe. Chacun de nos gestes repose sur l'intégration d'une multitude de paramètres. Inauguré par l'Université de Liège en février 2012 et consacré récemment Centre médical d'excellence officiel par la Fifa, conjointement avec la cellule SportS² du CHU de Liège, le Laboratoire d'analyse du mouvement humain (LAMH) s'intéresse principalement à la performance sportive et à la prévention des lésions chez l'athlète, mais s'ouvre aussi sur des applications en clinique humaine et même dans le domaine du génie civil.

Dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle, Eadward Muybridge devint célèbre pour ses décompositions photographiques du mouvement. Sa technique, la chronophotographie, méthode consistant à fixer les images successives d'un mouvement sur un même support photographique, inspira le physiologiste Étienne-Jules Marey, professeur au Collège de France, qui fut l'un des pionniers de l'approche scientifique de l'analyse du mouvement et, partant, de la biomécanique. Marey commença ses études par des recherches sur les animaux. Il s'intéressa ensuite à la locomotion humaine. Une de ses principales contributions fut la pose de marqueurs sur les vêtements des volontaires qui se prêtaient à ses travaux. Une méthode dont l'intérêt n'a jamais fléchi, puisque les systèmes optoélectroniques actuels supposent le placement de capteurs infrarouges ou autres sur la peau ou la tenue des sujets - généralement des patients et des athlètes - dont les biomécaniciens s'efforcent de décortiquer les mouvements.

Aujourd'hui, différents systèmes et procédés (caméras vidéo à haute vitesse, systèmes optoélectroniques, plateformes de force, électromyographie de surface...) permettent de quantifier la cinématique (mouvement) et la cinétique

(cause du mouvement) articulaire fonctionnelle des athlètes. Le geste sportif s'en trouve ainsi « disséqué » dans un but d'amélioration de la performance, mais aussi de prévention lésionnelle, ce second élément retentissant par ailleurs sur le premier.

Les biomécaniciens s'accordent pour considérer qu'il n'existe pas *a priori* un geste idéal vers lequel doivent tendre les athlètes, mais seulement un optimum pour un individu donné à un moment donné. En d'autres termes, l'efficacité d'un geste comme le lancer du javelot ou le swing du golfeur ne résulte pas d'une technique immuable qui doit être apprise comme une comptine pour enfant, mais plutôt d'une adéquation entre la force, l'expérience, les dispositions physiques et mentales du sportif au moment de l'action. Cela condamne-t-il pour autant toute recherche visant précisément à ordonner la pratique gestuelle de chacun ? Non, bien sûr. « Il existe des paramètres de performance que la biomécanique essaie de dégager », indique Bénédicte Forthomme, professeur au département des sciences de la motricité à la faculté de médecine de l'Université de Liège (ULg) et membre du LAMH. Par exemple, toutes autres choses étant égales, les tennismen dont les balles de service sont les plus rapides sont ceux qui amènent l'épaule en rotation externe à autant de



degrés et qui positionnent le corps de telle façon. On peut donc essayer d'optimiser ces paramètres, mais dans les limites de la morphologie propre à chaque athlète. »

Capteurs infrarouges

En 2012 donc, l'ULg a tenu sur les fonts baptismaux un laboratoire d'analyse du mouvement humain. Il s'inscrit dans une synergie avec une autre structure dépendant, elle, du CHU de Liège : SportS², dirigée par le professeur Jean-François Kaux. Une entité regroupant

l'ensemble des spécialités et outils qui, abstraction faite de la sphère de compétence du LAMH, intéressent les sportifs professionnels ou amateurs - chirurgie orthopédique, médecine physique, sciences de la motricité, psychologie du sport, pneumologie-allergologie (tests à l'effort), kinésithérapie, isocinétisme, diététique, cardiologie...

Le 19 octobre 2016, le binôme LAMH-SportS² a été consacré Centre médical d'excellence officiel par la Fédération internationale de football association (Fifa). Il est le premier en Fédération Wallonie-Bruxelles et le second en Belgique, après Roulers. Il rejoint ainsi, dans un cénacle très fermé, le

centre médical du FC Barcelone, choisi pour l'Espagne, ou le centre Aspetar, à Doha, au Qatar. « La reconnaissance de la Fifa porte sur 5 ans. Elle est exclusive : il n'y aura pas d'autres centres en Belgique francophone pouvant briguer le même label durant cette période. C'est au terme d'une évaluation minutieuse des compétences regroupées au sein de SportS² et du LAMH que la Fifa a décidé d'intégrer les structures universitaires liégeoises dans son réseau mondial de centres médicaux d'excellence », peut-on lire sur le site Internet du CHU de Liège.

Parmi plusieurs attributions, le LAMH est le centre expert pour l'analyse biomécanique chez les sportifs sous contrat de la Fédération Wallonie-Bruxelles. Le laboratoire est suffisamment diversifié pour accueillir des athlètes de nombreuses disciplines, dont des sprinters et des footballeurs. Il dispose en effet d'une piste de course d'une longueur de 27 mètres, laquelle peut être allongée de 6 mètres. Et, évidemment, l'ensemble de ses équipements sont à la pointe du combat.

Tout d'abord, les systèmes optiques. Voués à l'étude de la cinématique articulaire - déplacements, vitesses et accélérations des

Le 19 octobre 2016, le binôme LAMH-SportS² a été consacré Centre médical d'excellence officiel par la Fédération internationale de football association (Fifa).

De multiples applications

Tout geste est la résultante de l'activation des muscles suivant une séquence particulière. Mais celle-ci n'est pas unique : plusieurs séquences peuvent donner lieu au même mouvement. « Or, la manière dont les muscles sont recrutés influe sur la performance, dit Cédric Schwartz. Dans certains cas, elle peut aussi favoriser la survenue de lésions. » C'est pourquoi le LAMH recourt à l'électromyographie (EMG) de surface pour appréhender l'activité musculaire lors du geste, recueillir des informations sur le pattern de recrutement des muscles dans le temps. « Il s'agit de déterminer à quel moment et avec quelle intensité certains muscles interviennent dans la séquence productrice d'un geste et si cela est approprié », précise Jean-Louis Croisier. On peut également analyser l'impact, sur le geste, de l'ap-

parition de la fatigue, notamment dans les sports d'endurance. »

Actuellement, Julien Paulus, doctorant au sein du département des sciences de la motricité et chercheur au LAMH, étudie la question de la fatigabilité musculaire des membres inférieurs. Plus spécialement, il combine plateforme de force et électromyographie de surface pour apprécier la fatigue musculaire à travers des épreuves de saut. L'EMG lui permet de mieux comprendre, au niveau tant des muscles agonistes que des muscles antagonistes, les modifications induites par la fatigue dans le recrutement musculaire. Généralement, les données collectées en électromyographie de surface sont enregistrées à l'aide d'électrodes collées sur la peau et font l'objet d'une transmission sans fil, de sorte que la gestuelle du sportif n'est en rien entravée. La principale limite de la technique est qu'elle ne donne pas accès aux muscles profonds.

« Néanmoins, les principaux muscles des jambes et de l'épaule peuvent être étudiés », relativise Cédric Schwartz.

Dans son analyse du mouvement sportif, qui repose sur la synergie entre les informations livrées par les différentes techniques disponibles et traitées par des logiciels spécialisés, le LAMH ne vise pas exclusivement l'optimisation de la performance. Non, il est tout aussi attentif à la prévention des lésions et, en collaboration avec SportS², à la prévention de récurrences de blessures. Ainsi, plusieurs études ont montré qu'un déficit de force constitue un important facteur de rechute en cas de reprise de l'activité sportive après une blessure. « Via l'isocinétisme et les outils du LAMH, nous cherchons à dégager des données objectives dans un but de prévention primaire (détecter des anomalies qui pourraient être la cause d'une première blessure) et de prévention secondaire (éviter que le sportif ne se

blesse à nouveau) », insiste le professeur Croisier.

L'analyse du mouvement au moyen de techniques optoélectroniques pourrait également avoir un rôle à jouer en orthopédie par le biais d'une contribution à la conception et à la modélisation de prothèses. Mais ce n'est pas tout. Étirant le spectre plus largement encore, l'Unité de recherche des os et du cartilage, la faculté de Médecine Vétérinaire et le LAMH ont étudié les effets de certains aliments sur la marche de chiens aux membres arthrosés. Plus étonnant encore : le professeur Vincent Denoël, membre du LAMH, analyse les interactions d'une personne ou d'un groupe de personnes avec des structures de génie civil, telles les passerelles. De fait, l'entrée en résonance du mouvement intrinsèque de la structure et du mouvement des piétons peut avoir des conséquences fâcheuses, voire dramatiques. Avec ses passerelles expérimentales, le LAMH a établi un pont entre deux rives : la biomécanique et le génie civil...

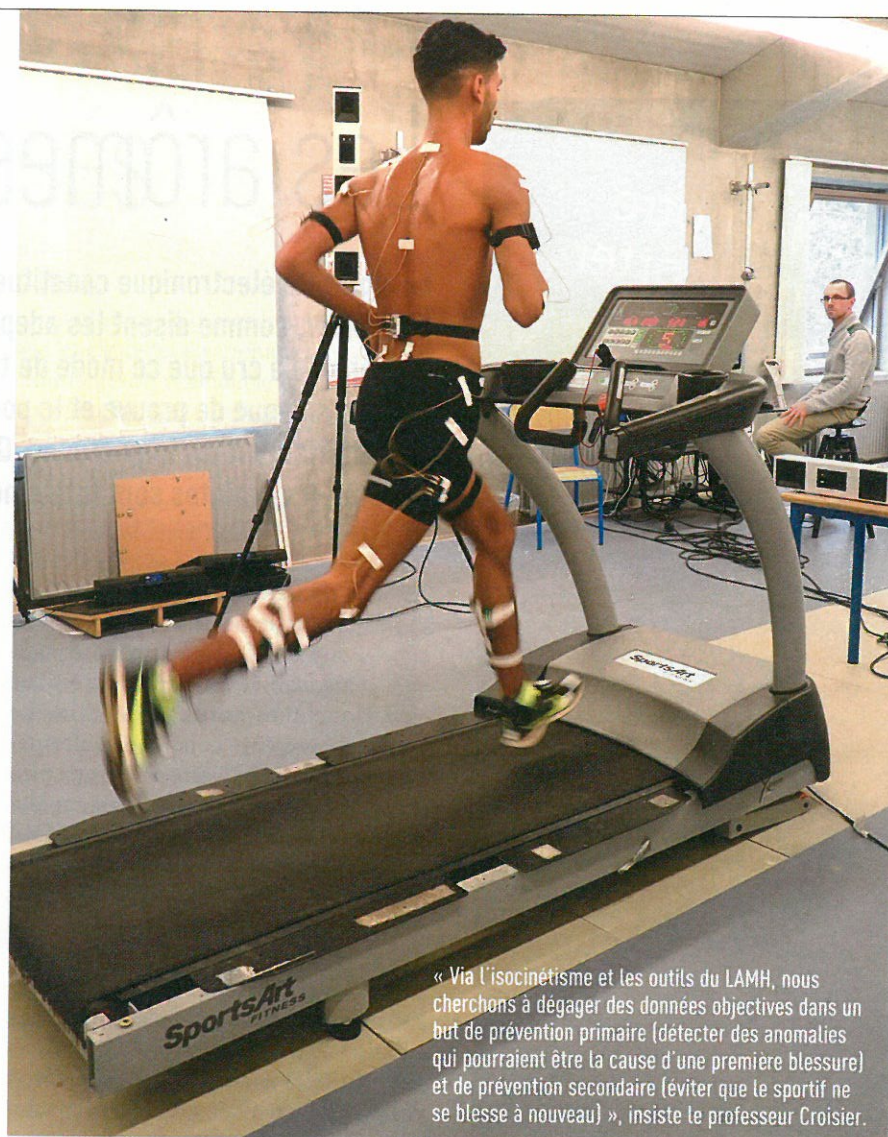
segments corporels -, ils reposent essentiellement sur des techniques optoélectroniques et des techniques vidéo. Dans le premier cas, des marqueurs (habituellement des capteurs infrarouges) sont posés sur la peau ou la tenue du sujet, à proximité des articulations. « La position de ces marqueurs a été codifiée par la Société internationale de biomécanique en fonction de l'activité étudiée, rapporte Bénédicte Forthomme. Ainsi, dans le cas de la marche, ils seront placés à des endroits précis sur les membres inférieurs. En revanche, lors d'une expérience relative au service des meilleurs tennismen de l'Association francophone de tennis, nous avons disposé des capteurs infrarouges toujours à des endroits précis, mais sur l'ensemble du corps des athlètes ainsi que sur leur raquette. » Quand le sportif se meut, des unités 3D photosensibles détectent en temps réel le mouvement des marqueurs. Grâce à des logiciels de traitement de données, le biomécanicien obtient la restitution des déplacements des segments corporels dans l'espace à trois dimensions, de même que le calcul des vitesses et des accélérations.

Approche multidisciplinaire

Le LAMH a opté pour le système Codamotion. Afin de couvrir un large champ de prises de vues et de pouvoir suivre ainsi des mouvements complexes, il s'est doté de 4 caméras capables d'enregistrer jusqu'à 800 images par seconde. Le dispositif 3D Codamotion est transportable et peut essaimer du laboratoire vers les terrains de sport. Son utilisation nécessite néanmoins des conditions de luminosité particulières qui le rendent plus difficilement exploitable en milieu extérieur.

Il existe une difficulté particulière inhérente aux systèmes optoélectroniques. En effet, lors des enregistrements 3D, les capteurs infrarouges sont posés le plus souvent sur la peau. Or, les déplacements de celle-ci ne sont pas le parfait décalque des mouvements animant les segments osseux qu'elle recouvre. Par exemple, on observe un important glissement cutané lors des mouvements de l'omoplate, alors que ce glissement s'avère beaucoup moindre dans le cas du genou. « L'estimation du mouvement est donc empreinte d'une erreur qui va dépendre des segments étudiés, du mouvement réalisé et de son amplitude, de la morphologie du sujet, du placement des marqueurs et des post-traitements de correction », écrivaient en 2013 des chercheurs du LAMH dans un article¹ dont le premier auteur était Cédric Schwartz, ingénieur et responsable du laboratoire liégeois.

Il est du ressort des ingénieurs de travailler à la définition d'algorithmes de « recalage » qui permettraient de contourner l'écueil, d'améliorer la qualité des évaluations. Il s'agit d'une mission complexe. D'autant qu'il faut tenir compte, dans les corrections, de différences interindividuelles liées notamment à l'importance de la masse musculaire et de la masse grasseuse. « Des progrès sensibles ont été réalisés mais, pour l'heure, il n'existe pas encore



« Via l'isocinétisme et les outils du LAMH, nous cherchons à dégager des données objectives dans un but de prévention primaire (détecter des anomalies qui pourraient être la cause d'une première blessure) et de prévention secondaire (éviter que le sportif ne se blesse à nouveau) », insiste le professeur Croisier.

de technique de mesure parfaite à la fois non invasive et dynamique », indique Cédric Schwartz. Ce problème technique est révélateur de l'impérieuse nécessité d'une approche multidisciplinaire de la biomécanique, à la croisée des sciences médicales, de l'ingénierie et de l'expertise des entraîneurs sportifs.

À côté des unités 3D, le LAMH possède plusieurs caméras 2D à haute vitesse, dont une submersible destinée à enregistrer les mouvements des nageurs. Elles sont gérées par un logiciel sophistiqué de traitement vidéo, baptisé Dartfish, et sont à même de fournir 50 à 120 images par seconde. Leur couplage permet de reconstituer le mouvement de l'athlète sous plusieurs angles de vues. Elles sont particulièrement indiquées pour un emploi sur le lieu même de l'entraînement sportif. « Gilles Berwart, notre spécialiste dans l'utilisation de ces caméras, accompagne certaines fédérations, ou, comme ce fut le cas avec la championne olympique Nafissatou Thiam, certains athlètes de haut niveau lors de stages d'entraînement individuels, rapporte Jean-Louis Croisier, professeur au département des sciences de la motricité. Et d'ajouter : « Nous agissons à la demande des entraîneurs. En aucune manière, nous ne cherchons à nous substituer à leur expertise ; notre but est de les aider à disséquer des parties de mouvements rapides ou complexes, tel un service au tennis, auxquelles ils n'ont pas accès par la simple analyse visuelle. »

Toujours selon le professeur Croisier, on pourrait considérer que les systèmes optoélec-

troniques offrent une approche presque microscopique du mouvement, tandis que les caméras vidéo à haute vitesse servent de support à une approche plus macroscopique. Un des intérêts des vidéos en 2D est de permettre à l'entraîneur et à l'athlète de visualiser directement le geste étudié et son évolution lors des tentatives de correction.

Plateforme de force submersible

Les technologies 2D et 3D sont complémentaires. Tout comme elles le sont d'autres outils. Parmi les plus importants figure la plateforme de force. Celle-ci permet de mesurer les appuis exercés sur le sol (force de contact, moments de cette force, position du centre de pression). Dans le cas d'un saut, par exemple, la plateforme peut rendre compte de la manière dont le sauteur gère son impulsion : vitesse sur la planche d'appel, temps d'impulsion, analyse de la poussée, etc. Les plateformes de force sont généralement intégrées au sol ou à une piste, de sorte que l'athlète n'est nullement perturbé par leur présence. Au LAMH, le couloir sur lequel s'effectuent les mesures est composé d'une succession de caissons interchangeables. Selon le type de sport ou la nature des études projetées, il est donc possible de placer les plateformes de force à l'endroit le plus approprié. « L'intérêt de ces mesures de force apparaît différent mais complémentaire des mesures analytiques d'isocinétisme² car elles sont réalisables lors de l'entraînement du sportif et donnent par conséquent des informations fonctionnelles sur le geste de

l'athlète lors de mouvements complexes », peut-on encore lire sous la plume des chercheurs du LAMH.

La faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège développe actuellement une plateforme de force submersible qui sera fixée sur un des murs verticaux d'une piscine d'essai. Objectif ? Mesurer la force de la poussée exercée sur le mur par les nageurs lorsqu'ils effectuent un « demi-tour » pour repartir dans le sens opposé. « Une fois encore, cette information sera complémentaire des tests isocinétiques que nous menons au sein de la structure SportS² et qui auront notamment permis de mesurer la force des quadriceps du nageur, commente le professeur Croisier. La plateforme de force submersible nous permettra de déterminer si l'on observe dans l'eau une perturbation du geste de nature à amoindrir la production de force et, in fine, la performance. L'utilisation d'une caméra submersible nous aidera en outre à mieux cerner la technique du nageur. »

La plateforme submersible aura également une autre vocation : rendre plus efficiente la réathlétisation des sportifs dans l'eau après une blessure. Par exemple après une intervention au niveau des ligaments croisés du genou. Grâce à la plateforme, il sera possible de quantifier les contraintes exercées aux niveaux articulaire et musculo-tendineux lors de la réalisation d'un exercice de rééducation. Une telle information en provenance du LAMH orientera la teneur des séances de rééducation proposées par SportS².

Revenons sur la terre ferme. Le LAMH possède un vélo avec des capteurs de force intégrés aux pédales, entre autres dans le but de mesurer si les poussées exercées sur chacune d'elles par le cycliste sont identiques. Dans un autre registre, le laboratoire, en collaboration avec le service de gériatrie du CHU de Liège a la possibilité d'utiliser un tapis de marche pour évaluer la marche des patients. Cet équipement fournit de nombreux paramètres spatiotemporels de la marche - longueur des foulées, vitesse, temps de contact du pied avec le sol, etc.

Philippe Lambert

Références

1. C. Schwartz et al., *Prévention des lésions musculo-squelettiques chez le sportif*, 41^e Entretiens de Médecine Physique et de Réadaptation 2013, Montpellier.
2. L'isocinétisme permet l'évaluation des performances musculaires (force) maximales et la rééducation des groupes musculaires éventuellement déficitaires par un entraînement sur un dynamomètre qui adapte instantanément sa résistance à la force développée par le sujet.

Le sport est au cœur de l'activité du LAMH. Toutefois, il n'en est pas l'unique moteur. En voici une illustration éloquentes sur laquelle nous reviendrons dans un prochain article. Une collaboration s'est nouée, dans le cadre de la maladie de Parkinson, entre le laboratoire et le service de neurologie (professeur Gaëtan Garraux) du CHU de Liège. Deux questions parmi d'autres sont à l'ordre du jour. Primo, peut-on définir un ou plusieurs patterns de marche dont la présence favoriserait un diagnostic précoce de l'affection ? Secundo, est-il possible d'évaluer l'efficacité de certains traitements via des mesures de biomécanique ?