

Réflexionsport

Numéro spécial

EXTRAIT

Individualisation
de l'entraînement
et de la prévention
en sprint :
le projet FULGUR

A female sprinter in a blue and white athletic uniform is captured in mid-stride on a blue track. She is wearing glasses and has her hair tied back. The background shows a blurred crowd of spectators and flags, suggesting a competitive event.

Réflexions Sport, n° 32, novembre 2024 : La science aux service des JOP

P. 24-39

e-ISSN : 2265-5441

Institut national du sport, de l'expertise et de la performance

Individualisation de l'entraînement et de la prévention en sprint : le projet FULGUR

Caroline Giroux

Laboratoire Sport, expertise, performance, INSEP

Consortium FULGUR

Résumé

Lors des Jeux olympiques, la course à vitesse maximale est le geste le plus régulièrement exécuté par les sportives et les sportifs, le 100 m étant considéré comme l'épreuve reine. Cependant, l'atteinte de telles vitesses de course en sprint demande à la fois des qualités physiques extrêmement développées, ainsi qu'un système musculo-squelettique robuste, afin de ne pas être trop exposé au risque de blessure. En effet, la blessure musculaire des membres inférieurs, particulièrement sollicités en sprint, est la première cause d'interruption de l'entraînement ou de la compétition sur la scène internationale. Dans ce contexte, la France présente la particularité d'être historiquement performante dans les sports de vitesse et d'être reconnue pour ses travaux de recherche en sciences du sport appliqués à la compréhension de la performance en sprint. Dans ce contexte, le projet FULGUR poursuit trois objectifs principaux : décrire la mécanique du sprint au niveau du centre de masse et des segments articulaires, afin de quantifier la charge d'entraînement spécifique au sprint, à ces échelles, en conditions réelles d'entraînement,

voire de compétition (lot de tâches 1) ; déterminer le profil musculo-squelettique de chaque athlète de très haut niveau en vue de proposer des programmes d'entraînement « sur-mesure » visant à optimiser l'efficacité de la propulsion en sprint (lot de tâches 2) ; estimer le niveau de risque de blessure et suggérer des stratégies de prévention individualisées basées sur une approche multifactorielle incluant l'environnement (nutrition, sommeil) et le comportement des athlètes (lot de tâches 3). Ces objectifs sont soutenus par des tâches transversales visant à améliorer l'analyse d'imagerie musculo-squelettique et du geste sportif à l'aide des techniques d'échographie et de *machine learning*.

Mots-clés : sprint, ischio-jambiers, entraînement sur mesure, disponibilité de l'athlète

Le projet FULGUR bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme d'investissements d'avenir portant la référence ANR-19-STHP-003. Les partenaires sont les fédérations françaises d'athlétisme, de rugby et de sports de glace, le CNRS, le CEA-List, Nantes Université, l'université de Savoie Mont-Blanc, l'université de Nice, l'université Jean Monnet Saint-Étienne, l'université Paris-Saclay, Supersonic Imagine et Natural Grass. Au total, le projet implique vingt-deux chercheuses et chercheurs.

Individualisation de l'entraînement et de la prévention en sprint : le projet FULGUR



Caroline Giroux

Laboratoire Sport, expertise, performance, INSEP

Consortium FULGUR



Quatre sportifs sur dix sélectionnés aux Jeux olympiques de Paris étaient engagés dans des disciplines incluant de la course à très haute vitesse. Dans ces disciplines la majorité des blessures sont musculaires et touchent les membres inférieurs. Aux Jeux olympiques de Tokyo, sur les 1 035 blessures rapportées par les comités olympiques nationaux, 119 concernaient des blessures musculaires (Soligard *et al.*, 2023). Tous sports confondus, plus de la moitié de ces blessures touchaient le groupe musculaire des ischio-jambiers et atteignaient jusqu'à 73 % en athlétisme (Katagiri, 2022). La blessure initiale étant le principal facteur de risque, réduire son incidence est une priorité stratégique des entraîneurs désireux d'augmenter la disponibilité des sportives et sportifs à s'entraîner pour pouvoir participer et être performants lors des échéances internationales. Les ischio-jambiers sont un groupe musculaire situé à l'arrière de la cuisse composé de quatre chefs (chef long et court du biceps fémoral, semi-tendineux et semi-membraneux). Ils sont particulièrement exposés au risque de blessure lors d'un sprint. En effet, les modèles biomécaniques suggèrent que la déformation, l'activation et la force produite par les ischio-jambiers sont maximales à la fin de la phase d'envol, juste avant le contact du pied avec le sol.

Malgré l'attention particulière portée par les principaux centres de médecine du sport de haut niveau à cette problématique, il est à noter que le taux de récurrence des blessures musculaires est resté significatif ces dernières décennies (14 à 63 %). La persistance de ce problème pourrait provenir (i) de critères inappropriés pour évaluer le niveau de risque, (ii) d'une compréhension limitée des interactions muscle-tendon

en conditions réelles de sprint, (iii) d'une planification perfectible de l'entraînement, notamment de la charge spécifique et/ou (iv) de méthodes de prévention dont l'efficacité a été insuffisamment démontrée. Ces constats renforcent le besoin d'une approche plus globale de la gestion de la blessure musculaire centrée sur le mouvement spécifique du sprint.

C'est avec l'ambition d'apporter des éléments de réponse à ces problématiques que le projet FULGUR a été construit en collaboration avec les fédérations françaises d'athlétisme, de rugby (Rugby à 7) et de sports de glace (Bobsleigh). Les sportives et sportifs de ces fédérations sont, en effet, engagés dans des disciplines où la vitesse maximale en sprint et les accélérations sont des facteurs clés de la performance et où l'exposition aux risques de blessures musculaires est particulièrement importante.

Basé sur le postulat que la planification d'un entraînement adapté aux propriétés musculo-squelettiques individuelles concourt à l'amélioration des capacités de résistance des tissus aux contraintes associées à la course à vitesse maximale, à l'amélioration de la performance et à la diminution du risque de blessures musculaires en sprint, ce travail vise à fournir aux entraîneurs des informations pertinentes dans une optique d'individualisation des contenus d'entraînement et de prévention.

« L'équipe de France de rugby à 7 a bénéficié d'un accompagnement scientifique privilégié, au travers du projet FULGUR, lors du cycle de préparation aux Jeux olympiques de Paris. Le profilage complet des joueurs et joueuses, au moyen des tests réalisés en laboratoire

et sur terrain, a permis de cibler les axes prioritaires d'entraînement et ainsi réduire le risque de blessure puis améliorer la performance en sprint. L'individualisation des entraînements des joueurs était ainsi au centre de notre projet. Nous avons ainsi pu observer que certains d'entre eux étaient déficients au niveau de la force des extenseurs de hanche ou encore de l'explosivité des fléchisseurs plantaires. »
(Julien Robineau, préparateur physique de l'équipe de France de rugby à 7 masculine)

“ Ce travail vise à fournir aux entraîneurs des informations pertinentes dans une optique d'individualisation des contenus d'entraînement et de prévention. ”

Un **consortium** composé de laboratoires leaders sur le plan international dans les domaines de la biomécanique, de l'entraînement musculaire et de l'imagerie médicale s'est donc constitué pour mener à bien le programme de recherche FULGUR. Depuis son démarrage officiel en janvier 2020, le projet s'organise autour de trois lots de travaux expérimentaux et deux lots de tâches transversales dont les objectifs scientifiques et les retombées pour les acteurs de la performance sportive sont présentés ci-après.

Lot de tâches 1 : Quantification de la charge mécanique en sprint

L'objectif de ce lot de tâches est de décrire la mécanique du sprint au niveau du centre de masse et des segments articulaires afin de quantifier la charge d'entraînement spécifique au sprint, à ces échelles, en conditions réelles d'entraînement, voire de compétition.

Dans le cadre de ce lot de tâches, des évaluations régulières de la relation

force-vitesse et charge-vitesse en sprint sont réalisées. Le protocole consiste pour la sportive ou le sportif à réaliser des sprints maximaux dans différentes conditions : sans charge, avec une charge légère et avec une charge élevée. Ces charges sont appliquées avec un système de résistance motorisé relié au sportif par un filin. Ces évaluations permettent de déterminer les qualités de force, de vitesse et de puissance de la sportive ou du sportif et de définir son profil de sprinter. Il est ensuite possible d'évaluer les performances et contraintes mécaniques impliquées durant l'entraînement au regard de ce profil de référence. Ce « profil force-vitesse » peut être déterminé à partir de mesures réalisées avec différents outils de terrain (laser, radar, système motorisé, GPS, cellules photoélectriques). Une des premières études réalisées dans le cadre de FULGUR a permis d'établir la validité, la reproductibilité et les limites de ces différentes méthodes (Fornasier-Santos *et al.*, 2022). Ainsi, ces évaluations peuvent être effectuées plusieurs fois dans la saison directement sur les sites d'entraînement ou en compétition, à partir du moment où un

sprint maximal est enregistré. Après chaque évaluation, un rapport individuel automatisé et connecté aux bases de données du projet FULGUR est transmis et présenté à l'athlète et son entraîneur. Ils peuvent ainsi comparer les paramètres d'intérêt issus du profil force-vitesse de l'athlète à des données de référence (aux autres athlètes élités de la même discipline) (Fig. 1). À partir de la relation charge-vitesse déterminée grâce au système de résistance motorisé, des préconisations de charges adaptées au développement spécifique de chaque capacité (force, puissance, vitesse) sont également proposées pour répondre aux besoins individuels de chaque sportive et sportif.

« Les données biomécaniques collectées dans le cadre de ce projet nous ont permis de mieux comprendre les profils force-vitesse-puissance et d'individualiser les charges de chaque sprinteur pour le développement spécifique de chacune de ces zones d'entraînement. Avec FULGUR, de nombreux entraîneurs ont pu être largement familiarisés aux méthodes d'évaluation des profils force-vitesse-puissance des athlètes, ce qui les a rendus autonomes en pôle pour répéter ces évaluations au fil des saisons. Grâce à une meilleure individualisation des contenus d'entraînement, nous espérons dans les années à venir être en mesure de réduire de manière significative le risque de récurrence des blessures musculaires, notamment au

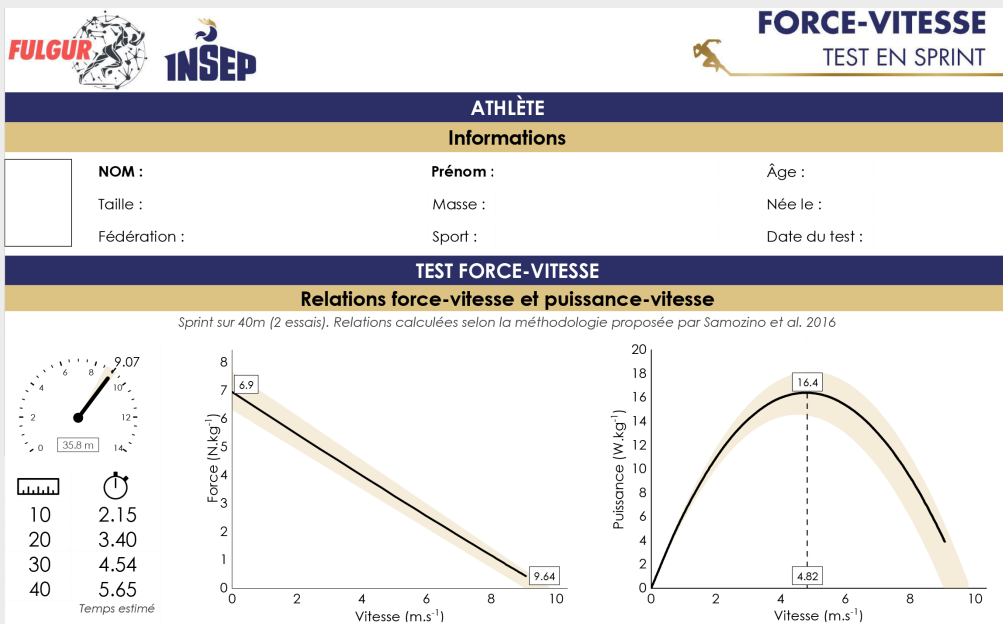


Figure 1 – Extrait d'un rapport Force-vitesse en sprint.

niveau des ischio-jambiers, qui sont particulièrement sollicités en sprint. » (Hugo Maciejewski, référent scientifique de la Fédération française d'athlétisme)

Afin de proposer des contenus d'entraînement spécifiques permettant de cibler ces secteurs, nous avons également mis en place une étude permettant de catégoriser mécaniquement un catalogue d'exercices (gammes) couramment utilisés dans l'entraînement en sprint.

En complément, des méthodes de suivi de la charge mécanique interne via la collecte du niveau d'effort perçu post-séance et une quantification de la charge externe sont mises en place, notamment par l'utilisation du GPS. L'utilisation du GPS est relativement ancrée aujourd'hui dans les sports collectifs. Les équipes de France de rugby à 7 impliquées dans le projet FULGUR en sont équipées et l'encadrement gère directement la quantification de la charge. Le projet FULGUR a permis de transposer progressivement ces pratiques à la caractérisation de la demande mécanique associée à la pratique du sprint en athlétisme. Il s'agit ici d'une évolution de paradigme majeure impulsée par le projet.

L'équipe FULGUR a ainsi équipé et suivi une vingtaine d'athlètes préparant les grandes échéances internationales. À l'issue de chaque séance, les athlètes et/ou l'encadrement transmettent le détail des exercices réalisés. Le signal GPS collecté est séquencé pour chaque phase de l'entraînement afin de mettre en relation les données mécaniques avec le contenu de l'entraînement et ainsi objectiver ces informations dans un rapport de séance individuel. Ces

rapports permettent de quantifier plusieurs paramètres décrivant la charge mécanique induite par la séance, dont certains ont été suggérés comme liés à l'exposition au risque de blessure (Duhig *et al.*, 2016) : nombre de kilomètres parcourus, durée de la séance, nombre de sprints générant une vitesse supérieure à 90 % de la vitesse maximale de sprint, nombre d'accélération supérieures à 3 m.s^{-2} . Ces rapports permettent aussi de comparer les efforts au sein d'une séance, entre deux séances ou encore avec des données de compétition. Ainsi, il est possible de mieux décrire ou de comparer l'effet de différents types de séances sur la charge et sur la mécanique du sprint. La compilation de chaque séance permet d'alimenter et de communiquer avec des bases de données vivantes et de proposer un suivi prospectif sur le plan de la charge d'entraînement spécifique. Des rapports hebdomadaires, trimestriels ou encore décrivant la mécanique du sprint en compétition peuvent aussi être produits à la demande.

« L'intégration des outils d'analyse fournis par le projet a bousculé notre suivi des athlètes en permettant une évaluation en temps réel des paramètres clés du sprint. Par exemple, le système de GPS et le dispositif de résistance motorisée (1080) nous permettent de suivre les performances, l'intensité des séances et plus globalement la charge d'entraînement dans les disciplines intégrant du sprint, chose qui était jusqu'à présent difficile à quantifier de manière précise. Avant FULGUR, nos évaluations se basaient principalement sur des ressentis et des observations visuelles. Aujourd'hui, nous disposons de rapports individualisés

qui nous indiquent précisément les charges optimales à appliquer pour chaque athlète en fonction de son profil. » (Hugo Maciejewski, référent scientifique de la Fédération française d'athlétisme)

« Le suivi quotidien du joueur de rugby, au moyen de la technologie GPS, a permis d'affiner la dynamique des charges d'entraînement à la fois en période de présaison mais aussi en période compétitive. Les indicateurs d'accélération et de distance sprintée sont très importants lors de la performance à l'entraînement et en match. » (Julien Robineau, préparateur physique de l'équipe de France de rugby à 7 masculine)

Lot de tâches 2 : Lien entre propriétés musculaires et performance en sprint

Ce lot de tâches consiste à étudier les relations entre les propriétés mécaniques musculaires, les coordinations musculaires et l'efficacité de la propulsion en sprint et le risque de blessure aux ischio-jambiers.

Le premier objectif de ce lot de tâches est d'étudier les relations entre les propriétés géométriques (volume, architecture) et mécaniques des muscles (force-vitesse, force-longueur) évaluées au niveau du membre inférieur (hanche, genou, cheville) et la performance évaluée au cours d'un sprint maximal (en lien avec le lot de tâches 1). En d'autres termes, les performances, notamment les profils force-vitesse-puissance, évaluées au cours des tâches de sprint, sont

comparées à ces mêmes profils obtenus lors d'évaluations mono-articulaires maximales réalisées dans des conditions standardisées (sur ergomètre) en laboratoire.

Les performances en sprint et lors des tests analytiques sont également mises en relation avec la morphologie musculaire de l'athlète. Après trois ans de développement en collaboration avec Nantes Université et l'École centrale de Nantes, la morphologie des muscles, en particulier les volumes musculaires, sont extraits au moyen de l'IRM via une segmentation automatique des muscles par intelligence artificielle (Piecuch *et al.*, 2023). Les examens IRM sont réalisés au centre d'imagerie de l'INSEP lors des évaluations annuelles des sportifs (Fig. 2).

Ce développement méthodologique constitue une avancée majeure puisqu'il offre la possibilité d'accéder au morphotype de l'athlète de manière accélérée (35 heures sont nécessaires à une segmentation manuelle contre quelques minutes avec cette technologie). Ajoutons que cet algorithme a été spécifiquement entraîné pour segmenter les muscles d'une population de sprinteuses et sprinteurs élités, ce qui en fait un outil unique en son genre. Ces

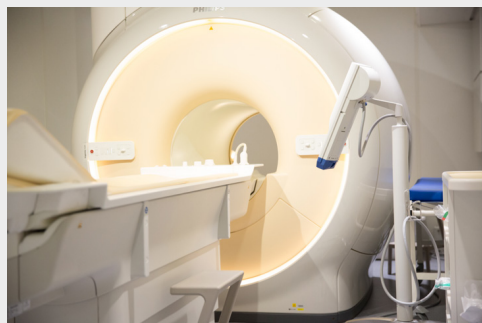


Figure 2 – a. IRM pôle imagerie INSEP ; b. Recorder

développements méthodologiques pourront être ré-appliqués pour d'autres populations (par ex. populations pathologiques). Compte tenu de l'importance croissante de ces informations pour estimer la performance d'une sprinteuse ou d'un sprinter, ou son exposition au risque de blessure, cet outil ouvre des perspectives de premier rang dans le domaine de l'individualisation de l'entraînement.

Les propriétés d'élasticité musculaires, tendineuses et articulaires de la chaîne postérieure de la cuisse sont également évaluées au cours d'un test fonctionnel global (*straight leg raise test*). Les propriétés élastiques locales de chacun des chefs des ischio-jambiers sont déterminées par une méthode appelée élastographie par onde de cisaillement. Cette méthode non invasive est sans effort pour le sportif. Elle renseigne sur la raideur du tissu musculaire en réponse à une contrainte (Fig. 3). Elle permet également de mesurer les modifications d'élasticité musculaire induites notamment par la cicatrisation post-blessure, qui est supposée accroître la raideur du muscle. Ces informations peuvent éclairer l'entraîneur sur les contenus de renforcement

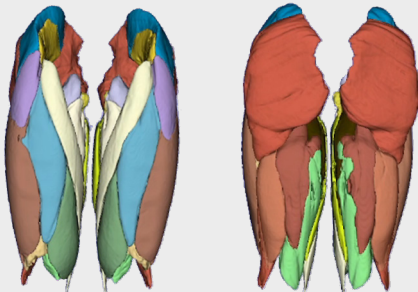
musculaire ou d'étirements à mettre en place pour augmenter ou diminuer la raideur des muscles cibles.

Comme pour le lot 1, ces évaluations sont proposées annuellement aux sportives et sportifs participant au projet. Des rapports automatisés individuels sont présentés et discutés avec les préparateurs physiques et kinésithérapeutes afin de proposer des pistes d'optimisation des qualités musculaires et de prévention des blessures. Chaque paramètre quantifié alimente des bases de données vivantes, c'est-à-dire mises à jour après chaque évaluation.

« Les innovations du projet, notamment l'élastographie par onde de cisaillement, ont transformé notre approche de la rééducation post-blessure. Nous disposons désormais d'un outil pour mesurer la raideur musculaire de chaque chef des ischio-jambiers et ajuster les programmes de renforcement et de mobilité en fonction des besoins spécifiques de chaque athlète. À l'avenir, ces informations seront extrêmement précieuses, car elles pourraient permettre au staff technique de mieux gérer la phase de retour à l'entraînement et de limiter le risque de rechute. » (Hugo Maciejewski, référent scientifique de la Fédération française d'athlétisme)

Vue antérieure

Vue postérieure



stitution des volumes musculaires par IA.

Le deuxième objectif du lot de tâches 2 est d'examiner les coordinations musculaires entre les quadriceps, les ischio-jambiers et les fessiers lors de contractions mono-articulaires, et pendant le sprint en course à pied. Ces analyses permettent de déterminer la contribution de chaque muscle à l'extension et à la flexion du genou et

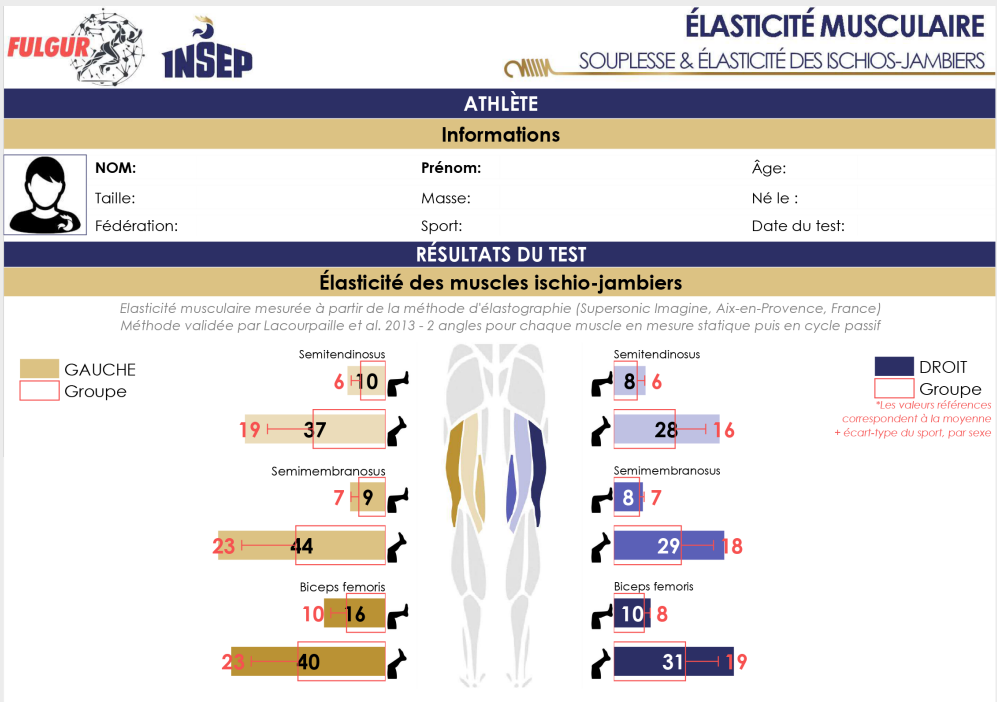


Figure 3 – a. Photographie de mesures des propriétés élastiques du muscle par élastographie ; b. Extrait du rapport d'élasticité.

de la hanche, et leur contribution à la performance en sprint. L'équilibre entre les contributions de chaque chef musculaire est étudié comme un facteur de performance, et reconnu comme lié à l'exposition au risque de blessure (Schuermans *et al.*, 2014 ; Avrillon *et al.*, 2018, 2020). Ces informations sont donc essentielles pour les entraîneurs pour concevoir des programmes de renforcement musculaire en fonction des muscles spécifiques à développer et/ou renforcer. Là encore, des rapports sont maintenant générés à chaque test pour les entraîneurs et athlètes.

En lien avec le lot 1, l'effet de la vitesse de mouvement et de la charge résistive en sprint sur les coordinations est également évalué. Plus la vitesse en sprint augmente, plus le groupe musculaire des ischio-jambiers est activé. À l'inverse, plus une charge résistive importante est appliquée en sprint, moins l'activation des ischio-jambiers sera importante. Cette étude permet de faire prendre conscience de ces résultats aux entraîneurs qui pouvaient jusqu'ici avoir une représentation allant à l'inverse (augmentation de l'activité de tous les muscles avec la charge).

Afin d'aller au bout de cette démarche, le consortium a développé une plate-forme représentant de manière interactive l'ensemble des données disponibles dans la littérature, relatives aux coordinations musculaires engagées lors de la réalisation d'exercices de renforcement musculaire des extenseurs de hanche. Cette plate-forme rend compte des distributions des activations musculaires entre les différents chefs des extenseurs de hanche, qui varient en fonction de l'exercice réalisé. Cet outil est accessible pour les entraîneurs impliqués

dans le projet, ce qui leur permet de prendre des décisions éclairées quant aux exercices à privilégier au regard des besoins individuels des sportifs qu'ils entraînent. Les fonctionnalités de la plate-forme ont été partagées lors des colloques fédéraux et assises réunissant les entraîneurs nationaux. À la demande de Christine Hanon (référente scientifique de la Fédération française d'athlétisme jusqu'en 2023), un poster a par exemple été réalisé et exposé lors des championnats de France d'athlétisme élite à Albi du 24 au 26 juin 2022 (Fig. 4).

Les données collectées dans le cadre du lot 2 peuvent aussi permettre de répondre a posteriori à des questions émergentes des entraîneurs nationaux. Par exemple, il serait possible d'explorer l'effet du type de pointes (classiques vs carbonées) sur les données précédemment collectées (données de force, données de coordinations et synergies musculaires, temps de vol, temps de contact, etc.).

“ Ces informations sont donc essentielles pour les entraîneurs pour concevoir des programmes de renforcement musculaire en fonction des muscles spécifiques à développer et/ou renforcer. ”



ACTIVATION DES ISCHIO-JAMBIERS EN RENFORCEMENT MUSCULAIRE

Soulevé de terre

VS.

Nordic Hamstring



COORDINATIONS

Pourcentage d'activation des chefs des ischio-jambiers
Moyenne + écart-type



Exercice sollicitant principalement le SM et le ST



Exercice sollicitant principalement le ST au début du mouvement et le BFI en fin de mouvement

VARIATIONS

Flexion du genou
Ceinture russe avec
inclinaison des pieds

⇒ ↑ ST

Sur une jambe

⇒ ↑ SM

VARIATIONS

De 45° jusqu'en extension complète
Allègement
Flexion de hanche

⇒ ↑ BFI

Balancier des bras avec un poids à
l'inversion

⇒ ↑ SM

19

REFERENCES

Nombre d'articles dont sont issues les données sources

15

Contact : fulgur@insep.fr

Figure 4 – Activation des différents chefs des ischio-jambiers en soulevé de terre et *nordic hamstring* d'après des données issues de la littérature.

Lot de tâches 3 : Approche multifactorielle de la prévention des blessures

Les objectifs de ce lot de tâches sont de mieux comprendre les facteurs liés à la survenue des blessures et de proposer des stratégies pour limiter leur incidence.

En plus des facteurs physiques collectés dans les lots 1 et 2, le lot 3 s'intéresse aux facteurs psychologiques et habitudes de vie (sommeil, hydratation, nutrition). Les sportives et sportifs renseignent, au moment des évaluations annuelles, un

questionnaire pour déterminer leurs profils psychologiques vis-à-vis de la performance et de la blessure. Les questions portent, par exemple, sur l'anxiété, la motivation, l'impulsivité ou encore la capacité à réguler des émotions. Un rapport individualisé est proposé au sportif.

C'est également dans le cadre de ce lot de tâches que sont collectés les historiques de blessure des sportives et sportifs depuis le début de leur carrière via un questionnaire. Ces données peuvent être complétées par les équipes médicales et sont archivées dans les bases de données du projet de manière automatisée tout au long du processus de

collecte. Ces données ont permis de mettre à jour les connaissances sur l'épidémiologie des sportives et sportifs en athlétisme, rugby à 7 et bobsleigh (Fig. 5) et peuvent guider les mesures de prévention chez ces populations.

Les liens entre les historiques de blessures et les facteurs de risques liés aux comportements ont aussi pu être analysés. Par exemple, les sportives et sportifs présentant un niveau élevé de gravité et d'apparition soudaine de blessure montrent des scores élevés de motivation intrinsèque, d'anxiété, d'impulsivité et des scores faibles de motivation extrinsèque et de difficultés de régulation des émotions. Ces éléments renforcent l'importance d'une prise en charge individualisée et globale des athlètes,

qui tient compte des aspects psychologiques en plus de la dimension physique.

Le lot 3 propose de suivre au quotidien les facteurs et les comportements liés au risque de blessures musculaires. Grâce à une application smartphone (Athlète360), les athlètes renseignent de manière biquotidienne des informations sur leur état émotionnel (motivation, anxiété), leur état de forme (niveau de perception de l'effort post-séance, fatigue) et sur leurs habitudes alimentaires (par ex. hydratation). Le sportif peut suivre au quotidien l'évolution de chaque paramètre sur des tableaux de bord. Les équipes encadrantes peuvent suivre l'état de forme global de chaque sportif. Via l'application, les sportifs peuvent aussi indiquer la survenue d'une nouvelle

Les blessures liées à la pratique du sprint élite en France

96% blessés au moins une fois dans leur carrière

62% blessés au cours de l'année écoulée

CARACTERISTIQUES DES BLESSURES

- Localisation** | ischio-jambiers (33%)
- Lésion** | musculaire (49%)
- Circonstance** | entraînement (70%)
- Survenue** | brutale (67%)
- Mécanisme** | non-identifiable (50%)
- Sévérité** | moyenne (37%)



Figure 5 – Infographie issue de Edouard *et al.* (2023).

blessure. À partir des données collectées de manière biquotidienne, l'équipe FULGUR a développé des algorithmes permettant de prédire la survenue des blessures (Tondut *et al.*, 2023). Ces algorithmes doivent être améliorés, et le taux de réponse des sportifs doit être le plus élevé possible avant qu'ils puissent être utilisés pour guider les entraînements, mais cette approche représente une avancée très importante dans le domaine de la prévention des blessures.

Sur la base des données collectées pour un athlète pendant une période de référence de plusieurs mois, en collaboration avec cet athlète et son encadrement, il est possible de développer des stratégies et de proposer des conseils individualisés pour tenter de réduire le risque de blessure. Chaque jour et en fonction de l'évolution par rapport aux jours précédents et à la période de référence, un message est proposé à l'athlète directement dans l'application, soit pour l'alerter sur d'éventuels comportements à risque et lui suggérer des recommandations pour tenter d'améliorer ses pratiques, soit pour renforcer ses bons comportements.

« L'approche holistique du projet Fulgur a également permis de prendre en compte les états de forme des joueurs dans leur globalité en intégrant les données de douleurs musculaires, de sommeil, d'hydratation, de niveau de stress et d'anxiété, etc. Ce suivi longitudinal, permettant de mettre en relation les états de forme avec les charges d'entraînement, aura également été bénéfique pour réduire le nombre de blessures et optimiser les qualités physiques neuromusculaires. » (Julien Robineau, préparateur physique de l'équipe de France de rugby à 7 masculine).

L'ultime tâche de ce dernier lot expérimental consiste en l'analyse croisée de l'ensemble des données collectées dans le projet. Les bases de données du projet contenant les indicateurs collectés dans les lots 1, 2 et 3 sont analysées à l'aide de méthodes statistiques et d'intelligence artificielle.

Comme pour les autres lots de tâches, les données collectées permettent de répondre à de nouveaux questionnements des entraîneurs. Les données d'état de forme peuvent, par exemple, permettre d'estimer les délais d'adaptation nécessaires et la charge mentale imposée aux sportifs qui se déplacent régulièrement sur plusieurs fuseaux horaires, générant des dérèglements chronobiologiques.

Lot de tâches transversal 1 : Accélération de l'analyse de l'imagerie musculo-squelettique et vidéos sans marqueurs

L'objectif de ce lot de tâches transversal est d'utiliser des techniques de vision artificielle et d'apprentissage automatique pour accélérer l'analyse (i) des méthodes d'imagerie des muscles squelettiques et (ii) des mouvements corporels.

Afin de répondre au premier objectif, le CEA a développé un logiciel d'annotation intelligent d'images musculaires obtenues par échographie. Cette technologie permet d'accéder à des paramètres qui décrivent la géométrie du muscle, notamment l'épaisseur de leurs enveloppes (aponévroses) ou encore la longueur des faisceaux de

fibres musculaires, qui sont des indicateurs morphologiques qui peuvent être liés au risque de blessure (Michard *et al.*, 2021).

L'équipe FULGUR a également fait évoluer les séquences d'élastographie par ultrasons, utilisées et décrites dans le lot de tâches 2, pour mesurer l'élasticité des régions musculaires particulièrement exposées aux blessures. En effet, cette méthode était jusqu'ici valide pour le corps (ou la partie centrale) du tissu musculaire. Or, les blessures touchent principalement les tissus tendineux (fascia, aponévroses, jonction myo-tendineuse). Une approche spécifique de caractérisation de ce type de tissus a donc été développée, afin d'évaluer l'élasticité de cette partie spécifique des muscles (Beuve *et al.*, 2021).

En ce qui concerne la capture de mouvement basée sur de la vidéo sans marqueurs, l'objectif est de développer un modèle précis d'estimation du squelette en 3D à partir d'un système multi-caméras synchrone faiblement calibré et simple à installer (Galizzi *et al.*, 2023). Des squelettes 3D sont estimés dans chacun des points de vue et fusionnés à l'aide d'un réseau de neurones. À partir du squelette 3D, des données cinématiques sont obtenues de manière non invasive : déplacement du centre de masse, temps de vol, temps de contact, vitesse et accélération angulaire, etc., qui peuvent être couplées avec les données de performance en sprint collectées dans le lot 1.

Ces avancées technologiques pourraient avoir un impact conséquent sur la capacité des entraîneurs à analyser la technique de sprint en temps réel sur la base d'indicateurs objectifs reflétant la cinématique du centre de masse et des articulations. Le caractère pleinement non invasif et la

facilité de mise en place des caméras sont autant d'avantages qui confèrent un intérêt pratique déterminant dans l'application de la technologie. Elle permet d'envisager des applications en situation de compétition.

Lot de tâches transversal 2 : Transfert innovant de savoir à destination des acteurs de la performance

L'objectif de ce dernier lot de tâches transversal est de s'assurer que l'ensemble des connaissances, outils et compétences développés dans le cadre du projet FULGUR bénéficie en premier lieu aux fédérations sportives impliquées dans le projet. L'ensemble du consortium FULGUR est donc mobilisé pour diffuser les savoirs et les connaissances auprès des acteurs de la performance sportive (sportifs, entraîneurs, préparateurs physiques, médecins, kinésithérapeutes, etc.), notamment au travers de la production et de l'explication des différents rapports mentionnés pour chaque lot de tâches, de la formation aux outils d'évaluation et de suivi de l'entraînement (par ex. sprint avec résistance motorisée, GPS, athlète 360), l'organisation et la participation à des rencontres et des séminaires ou encore à la rédaction d'articles scientifiques et techniques, etc.

Après quatre années, à l'issue du projet, de nombreuses données ont été collectées, comme l'illustre la Figure 6. Ces données, complexes à éclairer compte tenu des contraintes des sportifs des équipes de France, pour certaines toujours en cours d'analyse, donneront lieu à des publications

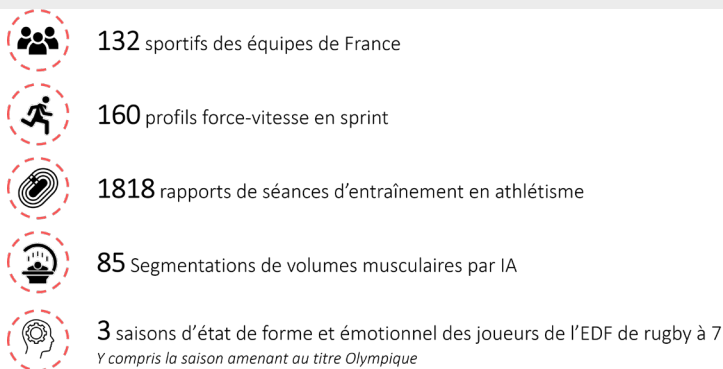


Figure 6 – Quelques chiffres bilan des données collectées dans FULGUR.

scientifiques visant à repousser les limites des connaissances au service de la préservation de la santé et de l'optimisation de la performance des sprinters. Les connaissances nouvelles issues de ce projet seront ainsi disponibles pour d'autres sportifs (élites ou non). Au-delà des objectifs scientifiques, le projet FULGUR a permis aux fédérations impliquées de monter en compétence dans leur capacité à prendre des décisions éclairées par des données et des connaissances scientifiques pour l'aide à l'entraînement. La réussite de FULGUR résonnera dans la capacité des acteurs sportifs à intégrer les outils d'aide à la décision développés dans le cadre du projet, afin d'optimiser la performance en sprint et de réduire le risque de blessure chez les athlètes ayant participé aux Jeux olympiques de Paris 2024 et qui participeront aux futures olympiades.

Bibliographie

Avrillon, S., Guilhem, G., Barthelemy, A. et Hug, F. (2018). Coordination of hamstrings is individual specific and is related to motor performance. *Journal of applied physiology*,

125(4), 1069-1079. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00133.2018>

Avrillon, S., Hug, F. et Guilhem, G. (2020). Bilateral differences in hamstring coordination in previously injured elite athletes. *Journal of applied physiology*, 128(3), 688-697. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00411.2019>

Beuve, S., Flandin, A., Nordez, A., Lacourpaille, L., Hug, F., Le Galèze, R., Guilhem, G. et Gennisson, J.-L. (2021). Quantification of elastic properties of Achilles tendon: a first step to explore muscle-tendon structures exposed to substantial injury incidence. *2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)* (p. 1-4). Xi'an, China. <https://doi.org/10.1109/IUS52206.2021.9593422>

Duhig, S., Shield, A. J., Opar, D., Gabbett, T. J., Ferguson, C. et Williams, M. (2016). Effect of high-speed running on hamstring strain injury risk. *British journal of sports medicine*, 50(24), 1536-1540. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095679>

Edouard, P., Caumeil, B., Giroux, C., Bruneau, A., Tondut, J., Navarro, L., Hanon, C., Guilhem, G. et Ruffault, A. (2023). Epidemiology of injury complaints in elite sprinting athletes in

athletics (Track and Field). *Applied Sciences*, 13(14), 8105. <https://doi.org/10.3390/app13148105>

Florentino, N. M., Rehorn, M. R., Chumanov, E. S., Thelen, D. G. et Blemker, S. S. (2014). Computational models predict larger muscle tissue strains at faster sprinting speeds. *Medicine and science in sports and exercise*, 46(4), 776-786. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000172>

Fornasier-Santos, C., Arnould, A., Jusseaume, J., Millot, B., Guilhem, G., Couturier, A., Samozino, P., Slawinski, J. et Morin, J.-B. (2022). Sprint acceleration mechanical outputs derived from position- or velocity-time data: a multi-system comparison study. *Sensors*, 22(22), 8610. <https://doi.org/10.3390/s22228610>

Galizzi, V., Amiot, A., Hegyi, A., Morales, A., Guilhem, G. et Luvison, B. (2023). *AI-driven sprint kinematics analysis using sagittal video footage for high-performance sprinting* [communication par affiche]. ECSS, Paris, France, juillet 2023.

Katagiri, H., Forster, B. B., Engebretsen, L., An, J. S., Adachi, T., Saida, Y., Onishi, K. et Koga, H. (2022). Epidemiology of MRI-detected muscle injury in athletes participating in the Tokyo 2020 Olympic Games. *British journal of sports medicine*, 57(4), 218-224. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-105827>

Michard, H., Bertrand, L., Quoc-Cuong, P., Morales-Artacho, A. J. et Guilhem, G. (2021). AW-Net: automatic muscle structure analysis on B-mode ultrasound images for injury prevention. BCB '21: *Proceedings of the 12th ACM Conference on Bioinformatics, Computational Biology, and Health Informatics* (p. 1-9). ACM. <https://doi.org/10.1145/3459930.3469531>

Piecuch, L. et al. (2023). Muscle volume quantification: guiding transformers with anatomical priors. Dans C. Wachinger, B. Paniagua, S. Elhabian, J. Li et J. Egger (dir.), *Shape in medical imaging. ShapeMI 2023. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 14350. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46914-5_14

Schuermans, J., Van Tiggelen, D., Danneels, L. et Witvrouw, E. (2014). Biceps femoris and semitendinosus—teammates or competitors? New insights into hamstring injury mechanisms in male football players: a muscle functional MRI study. *British journal of sports medicine*, 48(22), 1599-1606. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-094017>

Soligard, T., Palmer, D., Steffen, K., Lopes, A. D., Grek, N., Onishi, K., Shimakawa, T., Grant, M. E., Mountjoy, M., Budgett, R. et Engebretsen, L. (2023). New sports, COVID-19 and the heat: sports injuries and illnesses in the Tokyo 2020 Summer Olympics. *British journal of sports medicine*, 57. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-106155>

Tondut, J., Dandrieux, P.-E., Caumeil, B., Ruffault, A., Giroux, C., Guilhem, G., Navarro, L. et Édouard, P. (2023). Estimation du risque de blessures en utilisant le *machine learning* basée sur le *monitoring* de la perception des états physiques et mentaux des athlètes : étude préliminaire sur 110 athlètes de haut niveau suivis sur une période de 18 mois. *Journal de Traumatologie du Sport*, 8148(2), 74-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jts.2023.04.002>