LE SPORT *INTELLIGENT*

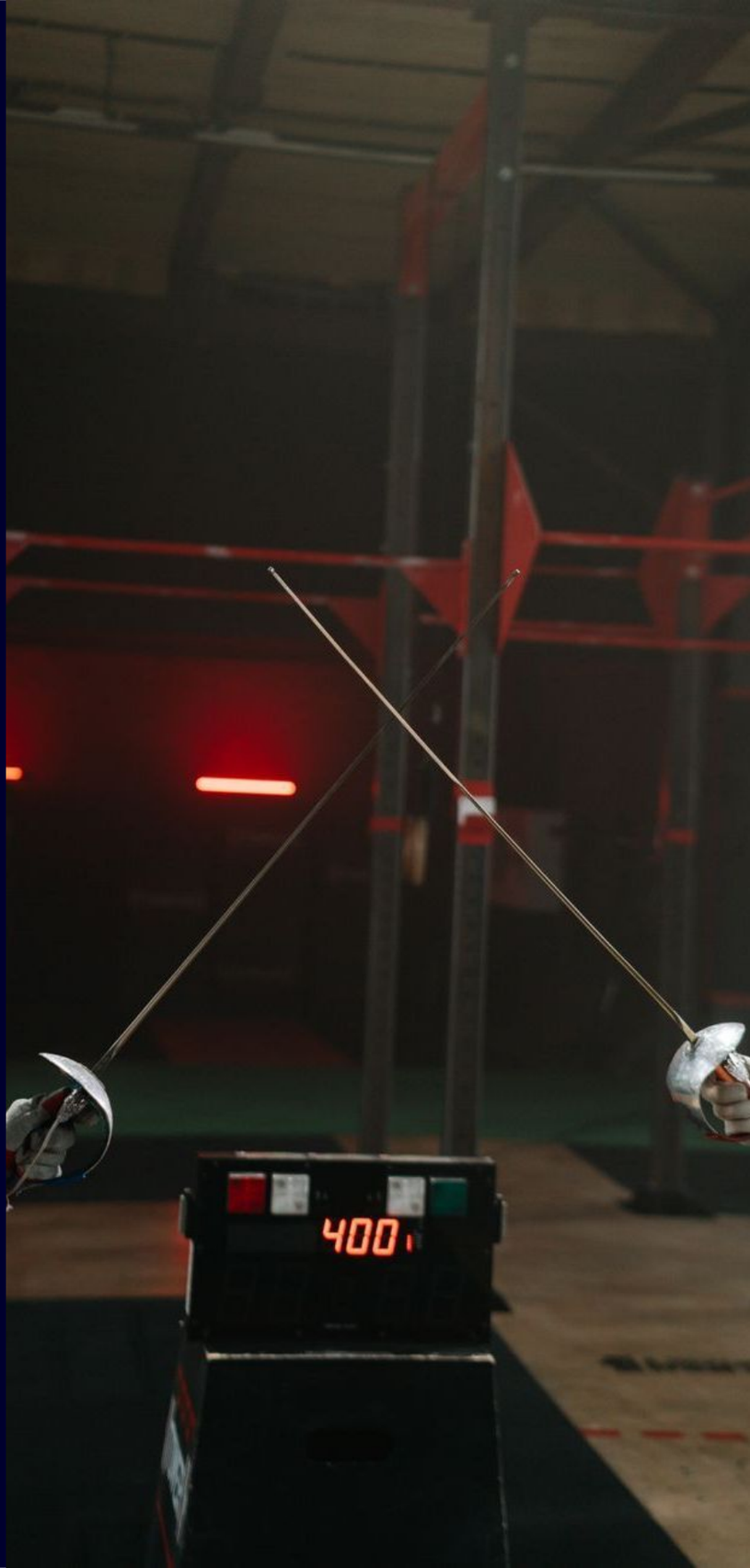
Du calcul intensif au jumeau numérique de l'athlète

Par le professeur Alain LORET

Le calcul intensif (HPC, pour *high-performance computing*) ne se contente pas d'accélérer le traitement des statistiques sportives : il déplace le régime de connaissance du sport, d'une science de la description vers une science de la prédiction. L'analyse vidéo reconstituait ce qui s'était passé ; la simulation explore ce qui aurait pu se produire et, de plus en plus, ce qui devrait se produire.

Concrètement, la simulation musculo-squelettique d'un geste, les essais virtuels de scénarios de charge et le jumeau numérique alimenté par les données issues de capteurs permettent de tester une technique ou une progression sans exposer le corps. Ces outils reposent sur des infrastructures nationales et européennes — CINES, IDRIS, TGCC coordonnés par GENCI, EuroHPC — plutôt que sur les clubs, ce qui redessine la frontière entre le laboratoire, le club et le centre de calcul.

Cet exposé interroge les promesses de cette prévision et ses angles morts : la validité des modèles, la justice dans l'usage des données personnelles et l'épistémologie d'une performance prédite plutôt que constatée.



Sommaire

Ce document traite de l'utilisation des technologies de calcul intensif et de modélisation musculo-squelettique pour prédire et optimiser la performance sportive.

Evolution du sport vers la simulation prédictive

- Le calcul intensif transforme le sport en science de la prévision plutôt que de la simple description.
- La simulation musculo-squelettique et les jumeaux numériques permettent d'analyser et tester des scénarios sans mobiliser l'athlète.

Données sportives et analyses

- La collecte multisource de données en temps réel inclut position, vitesse, fréquence cardiaque ou engagement physique.
- L'analyse des trajectoires et leur variabilité remplace l'événement ponctuel, nécessitant l'apprentissage automatique et la fusion de capteurs.

Biomécanique et simulation prédictive

- La modélisation du corps en segments reliés par des muscles et tendons permet de prévoir des gestes en contrôles optimaux.
- La simulation rapide (en 30 minutes) ouvre la possibilité d’expérimenter en série divers scénarios pour optimiser entraînement et performance.

Infrastructures de calcul et accès

- Centres nationaux français et supercalculateurs européens (EuroHPC) offrent la puissance nécessaire pour des simulations complexes.
- La disponibilité du calcul détermine la capacité à transformer des données en prévisions et décisions concrètes.

Jumeaux numériques et sport

- Répliques numériques alimentées en continu par les données personnelles permettent de tester charges et stratégies.
- La calibrations des modèles est essentielle, mais leur validité dépend de la précision et du protocole de validation.

Enjeux éthiques et épistémologiques

- La validité des modèles, la justice dans la gestion des données et leur gouvernance restent des défis majeurs.
- La performance prédite soulève des questions sur la parole de vérité avant l’action et la gouvernance collective du corps calculable.

Table des matières | Cliquer sur les liens pour accéder directement aux chapitres

- Du sport mesuré au sport instrumenté
- La biomécanique prédictive
- Expérimenter sans le corps
- Le calcul comme commun : une souveraineté par les infrastructures
- Du jumeau numérique à l'hybridation
- Les angles morts : validité, justice, épistémologie
- Le corps comme objet calculable
- Conclusion
- Références biblioraphiques indicatives
- Glossaire

Du sport mesuré au sport instrumenté

Le point de départ est un changement de nature des données sportives. La position du corps sur le terrain à plusieurs dizaines de relevés par seconde, la vitesse de déplacement, le rythme cardiaque, la puissance d'accélération ou l'engagement physique forment un flux continu, multisources et hétérogène, qu'il faut être capable d'analyser d'un seul tenant et en temps réel.

Les technologies portables ont rendu ce flux accessible hors des laboratoires (Seshadri et al., 2019), tandis que le suivi optique et les systèmes de positionnement ont fait de l'espace de jeu lui-même un objet de mesure (Rein & Memmert, 2016).

La conséquence est épistémologique autant que technique. L'unité d'analyse n'est plus l'événement — le but, la passe, le sprint — mais la trajectoire et sa variabilité ; le résultat pertinent n'est plus la moyenne, mais la distribution des états possibles. Cette masse de données ne se laisse plus traiter par tableur : elle exige des chaînes d'assimilation, de fusion de capteurs et d'apprentissage automatique, dont la littérature a montré qu'elles constituaient déjà un changement d'échelle pour l'analyse du jeu (Morgulev et al., 2018).

Les environnements immersifs, où un athlète répète une situation de jeu en réalité virtuelle, y ajoutent leurs propres traces : latence, erreurs de coordination, réponses oculomotrices. Autant de données qui n'existent nulle part ailleurs que dans le dispositif qui les produit.

La biomécanique prédictive

Prenons la foulée d'une marathonienne. Comprendre comment la fatigue s'installe suppose, par exemple, de relier les contraintes subies par les tendons d'Achille aux muscles associés et à la coordination du corps entier, puis de reprendre le calcul pour des milliers de variantes de vitesse, de dénivelé, de longueur de foulée ou de types chaussures. Il s'agit d'un problème de contrôle optimal, résolu par un modèle musculo-squelettique où chaque segment, chaque muscle et chaque contact avec le sol obéit à ses propres équations.

Ce modèle représente le corps comme des segments reliés par des articulations, des muscles activés selon une commande neuronale et des tendons qui transmettent la force et restituent l'énergie. Les contacts avec le sol définissent les phases où la jambe porte la charge, la relâche ou propulse. Le calcul est lourd : des centaines de variables sont déterminées simultanément sous des équations non linéaires, en respectant les lois de la biomécanique et en minimisant un critère de coût énergétique, puis répétées pour chaque scénario étudié.

Attention ! Prédire un geste ce n'est pas le mesurer. Là où la mesure décrit ce qui s'est produit, la prédiction permet d'explorer ce qui n'existe pas encore.

Au service de la préparation comme de la prévention, le jumeau numérique [avatar] devient un terrain d'essai virtuel où les hypothèses sont testées avant d'être confrontées aux données réelles.



Expérimenter sans le corps

Les plateformes ouvertes ont rendu ce programme praticable. OpenSim, développé à Stanford, a mis la simulation dynamique du mouvement à la disposition de la communauté (Delp et al., 2007) ; cette ouverture ne se limite pas à la mise à disposition d'un logiciel. Un modèle musculo-squelettique, une formulation de contraintes ou une méthode de résolution peuvent désormais être partagés, examinés et reproduits par un autre laboratoire, ce qui était difficilement envisageable lorsque chaque équipe développait ses propres outils et ses propres hypothèses.

La reproductibilité des résultats devient alors une propriété concrète du travail, et non plus une promesse. Elle réduit également la barrière d'entrée : une équipe disposant de compétences en biomécanique, mais dépourvue d'un environnement de développement lourd, peut aborder des questions qui lui étaient auparavant fermées. Les travaux sur les principes d'optimalité ont montré que l'on pouvait prédire la marche à partir de critères de performance plutôt que la reproduire pas à pas (Ackermann & van den Bogert, 2010). Ce changement de perspective modifie la démarche scientifique elle-même. Reproduire un mouvement revient à ajuster un modèle à des données existantes ; le prédire à partir d'un critère revient à formuler une hypothèse sur la manière dont le système nerveux organise le geste, puis à vérifier si cette hypothèse rend compte des observations. On ne cherche plus seulement à décrire la marche, mais à tester ce qui la gouverne, qu'il s'agisse de la minimisation de l'effort, de la stabilité ou de la préservation des tissus.

Le verrou est longtemps resté le coût : prédire un cycle de marche bidimensionnel demandait déjà des dizaines de minutes de temps processeur, et le passage à la trois dimensions multipliait ce coût. Les méthodes de simulation prédictive rapide ont changé l'ordre de grandeur : un cycle tridimensionnel s'obtient aujourd'hui en une trentaine de minutes en moyenne, soit plus de vingt fois plus vite que les approches antérieures (Falisse et al., 2019). C'est ce passage de l'heure à la demi-heure qui fait basculer la simulation du statut d'expérience de laboratoire à celui d'outil d'aide à la décision — et qui rend la puissance de calcul décisive (De Groote & Falisse, 2021). Concrètement, ce gain autorise l'exploration systématique de nombreux scénarios. Il devient possible de comparer en série plusieurs variantes de chaussure, d'évaluer l'effet d'une fatigue croissante ou d'une charge additionnelle, puis d'examiner comment ces facteurs se combinent. Là où une étude expérimentale ne permet de tester qu'un nombre restreint de conditions, la simulation prédictive ouvre un espace de recherche beaucoup plus vaste, dans lequel les configurations les plus prometteuses peuvent ensuite être sélectionnées pour une validation en conditions réelles. Le passage de l'expérience ponctuelle à l'aide à la décision tient précisément à cette capacité à répondre rapidement à des questions pratiques, avant qu'une décision ne soit prise.

L'ordre de grandeur mérite d'être précisé : ce n'est pas tant le nombre d'opérations par seconde qui manque à un club que la capacité à résoudre en série des problèmes d'optimisation de grande taille. Un club professionnel dispose de capteurs et de serveurs ; il dispose rarement d'une file de calcul capable de faire tourner des milliers de simulations pendant qu'il prépare un match. La rareté n'est pas celle de la donnée, mais celle du temps de calcul alloué. Cette situation crée un paradoxe : le club accumule des mesures détaillées sur ses athlètes, mais ne peut pas toujours les transformer en scénarios testés avant une décision. Les données restent alors descriptives, faute de temps pour les soumettre à l'hypothèse. Il en résulte que l'accès au calcul, plus encore que l'accès aux données, conditionne la capacité d'une structure à passer de l'observation à la prédiction. Cette contrainte prépare la question suivante : comment les infrastructures de calcul, nationales et européennes, peuvent-elles mettre cette puissance à disposition des équipes qui n'en disposent pas en interne ?

Le calcul comme commun : une souveraineté par les infrastructures

En France, cette puissance se trouve notamment dans les trois centres nationaux de calcul — le CINES à Montpellier, l'IDRIS du CNRS et le TGCC du CEA —, dont GENCI coordonne l'équipement et l'allocation (GENCI, s. d.). À l'échelle du continent, le programme EuroHPC prolonge ces moyens par un réseau de machines pré-exascales, de LUMI en Finlande à Leonardo en Italie et à MareNostrum 5 en Espagne, et, depuis 2025, par JUPITER, premier supercalculateur exascale européen, capable d'une puissance soutenue de 1 exaflop (EuroHPC Joint Undertaking, 2026). La France doit par ailleurs accueillir sur le site du TGCC la machine exascale Jules Verne (GENCI, s. d.).

L'argument n'est pas seulement capacitaire, il est politique. Le sport s'inscrit ainsi dans une logique de recherche ouverte, distribuée et souveraine : un laboratoire de STAPS peut y entraîner ses modèles et en partager les résultats sans dépendre du seul cloud privé. Les appels d'accès d'EuroHPC, ouverts aux équipes académiques comme industrielles, instituent le calcul comme un bien commun européen ; ils font de la modélisation du geste sportif un objet de politique scientifique, au même titre que la climatologie ou la génomique. La souveraineté ne se joue pas seulement sur les données : elle se joue sur les modèles, sur leur traçabilité et sur les conditions dans lesquelles ils sont entraînés.

Cette configuration produit toutefois une nouvelle ligne de partage. Entre le laboratoire qui obtient des heures sur une machine exascale et le club qui loue un service clé en main, la différence n'est pas d'équipement mais de capacité d'interprétation. Le calcul intensif ne démocratise pas mécaniquement la performance : il déplace l'avantage compétitif vers ceux qui savent poser les bonnes hypothèses et auditer les modèles.

Du jumeau numérique à l'hybridation

La même puissance permet d'envisager le jumeau numérique d'un athlète, c'est-à-dire une réplique computationnelle alimentée en continu par ses données, sur laquelle un préparateur éprouve plusieurs semaines de charge d'entraînement avant d'en imposer une seule au corps réel. Le concept, stabilisé dans l'ingénierie industrielle, désigne moins une copie qu'un système de couplage entre un objet physique et un modèle qui évolue avec lui (Barricelli et al., 2019) ; appliqué au sport, il a donné lieu à des taxonomies précises, du jumeau d'équipement au jumeau physiologique (Hliš et al., 2024).

Les réalisations existent. Un modèle physiologique individualisé, calibré sur des cyclistes de niveau national, permet de simuler des records et des tests d'effort de trois minutes conformes aux observations de terrain (Boillet et al., 2024) : la stratégie de course y est testée *in silico* avant d'être courue. Pendant un match, la même logique de couplage permet de croiser en direct les données de position et les signaux physiologiques pour indiquer au banc quel joueur décroche physiquement — non plus après la rencontre, mais au moment où la décision peut encore changer son cours.

Ainsi naît un « sport computationnel », où la performance se construit autant dans les environnements numériques que sur les terrains. Il ne faut pas s'y tromper : le jumeau n'est pas un miroir. C'est une machine à produire des hypothèses, dont la valeur dépend entièrement du protocole de calibration et de la validation externe. Un modèle qui prédit correctement un cycle de marche ne dit rien, par lui-même, de la fatigue au dixième kilomètre.

Les angles morts : validité, justice, épistémologie

Validité

Les simulations musculo-squelettiques reposent sur des paramètres — raideurs, activations, géométries — dont l'incertitude se propage, et l'absence de quantification systématique transforme souvent une prédiction plausible en certitude d'apparence scientifique (De Groote & Falisse, 2021).

Justice

La biométrie sportive soulève des problèmes de consentement, de surveillance, de confidentialité et de coercition que la littérature bioéthique a documentés avant même l'arrivée des jumeaux numériques (Karkazis & Fishman, 2017) ; l'asymétrie entre l'athlète, qui fournit les données, et l'organisation, qui détient le modèle, en constitue le prolongement direct.

Épistémologie

Que fait-on lorsque la performance est prédite avant d'être réalisée ? Le sport computationnel ne se contente pas d'optimiser : il transforme la manière dont un entraîneur justifie une décision, dont un athlète se représente son propre corps, dont une fédération définit l'équité. La comparaison avec la médecine *in silico* est éclairante : c'est moins la puissance des machines que la gouvernance des modèles — auditabilité, ouverture, validation indépendante — qui déterminera si le calcul intensif devient un commun ou un avantage privé.



Le corps comme objet calculable

Le calcul intensif ne fait pas seulement gagner du temps : il change ce que l'on peut tenir pour vrai dans le sport. En rendant le corps simulable, il déplace la compétition vers les infrastructures qui rendent la simulation possible et vers les institutions capables d'en garantir la validité.

La question prospective n'est donc pas de savoir si les clubs auront accès à un supercalculateur, mais selon quelles règles ils pourront s'en servir : c'est là que se jouera, dans les prochaines années, la différence entre un sport augmenté et un sport asservi à ses modèles.

Conclusion

Cette analyse montre comment le sport s'est déplacé du mesuré vers l'instrumenté. Les données classiques de position, enregistrées sur la base de quelques relevés par seconde, s'enrichissent désormais d'un nouveau type de data protéiformes et multifonctionnelles fournies en masse par des capteurs embarqués qui transforment chaque geste en information exploitable. Sur cette base, la biomécanique prédictive permet d'expérimenter sans mobiliser le corps : la foulée d'une marathonienne peut être reconstruite comme un problème de contrôle optimal sur un modèle musculo-squelettique, et l'on peut simuler l'effet de la fatigue, d'une chaussure technologiquement avancée ou d'une blessure réelle ou potentielle sans exposer l'athlète. Des outils comme OpenSim, dont les travaux de Delp et al. (2007) ont posé les bases, rendent possible la prédiction d'un cycle d'actions tridimensionnel en une trentaine de minutes, soit plus de vingt fois plus vite qu'auparavant. Ce qui autorise l'exploration en série de nombreux scénarios, comme le soulignent Ackermann et van den Bogert (2010) puis Falisse et al. (2019).

Cette capacité repose toutefois sur une infrastructure de calcul intensif dont l'accès est loin d'être neutre. Les centres nationaux, le CINES à Montpellier, l'IDRIS du CNRS et le TGCC du CEA, coordonnés par GENCI, ainsi que les supercalculateurs européens portés par EuroHPC, dont l'exascale JUPITER, permettent de construire des répliques computationnelles de l'athlète, alimentées en continu par ses données, sur lesquelles un préparateur peut éprouver plusieurs semaines de charge d'entraînement avant de les appliquer. Le goulot d'étranglement se situe moins dans la disponibilité des données que dans la rareté du temps de calcul, que peu de clubs peuvent obtenir. Cette hybridation entre expérimentation physique et simulation transforme ainsi le jumeau numérique en instrument de décision, et de Groote et Falisse (2021) montrent combien la qualité de ces modèles dépend de leur calibration.

Cette transformation laisse pourtant des angles morts que l'analyse ne doit pas occulter. La validité des modèles reste conditionnée par l'incertitude de paramètres tels que les raideurs, les activations musculaires ou les géométries, incertitude qui se propage d'une étape à l'autre sans être systématiquement quantifiée. La justice dans l'usage des données biométriques demeure tout aussi fragile : le consentement, la surveillance, la confidentialité et les risques de coercition se posent avec d'autant plus d'acuité que l'athlète fournit les données tandis que l'organisation détient le modèle, comme le rappellent Karkazis et Fishman (2017). Enfin, l'épistémologie d'une performance prédite interroge ce que l'on accepte de tenir pour vrai avant que le geste ne soit accompli, car une simulation peut ainsi acquérir une autorité qui précède l'épreuve elle-même.

L'enjeu décisif n'est donc pas la puissance des machines, mais la gouvernance des modèles et les règles d'accès au calcul. Leur auditabilité, leur ouverture et leur validation indépendante détermineront si le calcul intensif devient un commun ou un avantage privé, et si le sport demeure augmenté par ses outils ou asservi à ses modèles. Dans les années à venir, c'est bien cette capacité collective à encadrer le corps calculable qui fera la différence.

Références biblioraphiques indicatives

Ackermann, M., & van den Bogert, A. J. (2010). Optimality principles for model-based prediction of human gait. *Journal of Biomechanics, 43*(6), 1055–1060.

Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access, 7*, 167653–167671.

Boillet, A., Messonnier, L. A., & Cohen, C. (2024). Individualized physiology-based digital twin model for sports performance prediction: A reinterpretation of the Margaria–Morton model. *Scientific Reports, 14*(1), Article 5470. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56042-0

De Groote, F., & Falisse, A. (2021). Perspective on musculoskeletal modelling and predictive simulations of human movement to assess the neuromechanics of gait. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 288*(1946), Article 20202432.

Delp, S. L., Anderson, F. C., Arnold, A. S., Loan, P., Habib, A., John, C. T., Guendelman, E., & Thelen, D. G. (2007). OpenSim: Open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 54*(11), 1940–1950.

EuroHPC Joint Undertaking. (2026). *Our supercomputers*. https://www.eurohpc-ju.europa.eu/supercomputers/our-supercomputers_en

Falisse, A., Serrancolí, G., Dembia, C. L., Gillis, J., Jonkers, I., & De Groote, F. (2019). Rapid predictive simulations with complex musculoskeletal models suggest that diverse healthy and pathological human gaits can emerge from similar control strategies. *Journal of the Royal Society Interface, 16*(157), Article 20190402. https://doi.org/10.1098/rsif.2019.0402

GENCI. (s. d.). *Means of calculation*. Consulté le 6 novembre 2026, à l'adresse https://www.genci.fr/en/services/means-calculation

Hliš, T., Fister, I., & Fister, I., Jr. (2024). Digital twins in sport: Concepts, taxonomies, challenges and practical potentials. *Expert Systems with Applications, 258*, Article 125104. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125104

Karkazis, K., & Fishman, J. R. (2017). Tracking U.S. professional athletes: The ethics of biometric technologies. *The American Journal of Bioethics, 17*(1), 45–60. https://doi.org/10.1080/15265161.2016.1251633

Morgulev, E., Azar, O. H., & Lidor, R. (2018). Sports analytics and the big-data era. *International Journal of Data Science and Analytics, 5*(4), 213–222. https://doi.org/10.1007/s41060-017-0093-7

Rein, R., & Memmert, D. (2016). Big data and tactical analysis in elite soccer: Future challenges and opportunities for sports science. *SpringerPlus, 5*, Article 1410. https://doi.org/10.1186/s40064-016-3108-2

Seshadri, D. R., Li, R. T., Voos, J. E., Rowbottom, J. R., Alfes, C. M., Zorman, C. A., & Drummond, C. K. (2019). Wearable sensors for monitoring the physiological and biochemical profile of the athlete. *npj Digital Medicine, 2*, Article 72. https://doi.org/10.1038/s41746-019-0150-9

Glossaire

- **Contrôle optimal** : problème consistant à déterminer les commandes (activations musculaires) qui produisent un mouvement en minimisant un critère de coût, par exemple l'effort métabolique, sous les lois de la mécanique.
- **EuroHPC** : programme européen (EuroHPC Joint Undertaking) qui met en réseau des supercalculateurs pré-exascales (LUMI, Leonardo, MareNostrum 5) et exascale (JUPITER), avec des appels d'accès ouverts aux équipes académiques et industrielles.
- **Exascale** : se dit d'un supercalculateur capable d'au moins un exaflop, soit un milliard de milliards d'opérations par seconde ; JUPITER est le premier exascale européen.
- **GENCI** : structure française qui coordonne l'équipement et l'allocation des moyens de calcul des trois centres nationaux (CINES, IDRIS, TGCC).
- **HPC (calcul intensif)** : high-performance computing, usage de supercalculateurs pour résoudre des problèmes trop volumineux pour des machines ordinaires.
- **Jumeau numérique** : réplique computationnelle d'un objet ou d'un athlète, alimentée en continu par des données, couplée à l'objet physique et évoluant avec lui.
- **Modèle musculo-squelettique** : représentation du corps en segments rigides, articulations, muscles activés et tendons élastiques, avec contacts au sol.
- **OpenSim** : plateforme ouverte de simulation dynamique du mouvement, développée à Stanford.
- **Simulation prédictive** : simulation qui prédit un mouvement à partir de critères de performance plutôt que de le reproduire à partir de mesures.
- **In silico** : expérimentation réalisée par simulation numérique plutôt que sur le corps réel.