

# **Analyse et perspectives de l'intelligence artificielle dans le sport de haut niveau**

Présenté par  
Quentin CLÉMENT  
Le 3 septembre 2025

# Résumé

Ce mémoire analyse les apports de l'intelligence artificielle (IA) dans le domaine sportif selon trois axes principaux : la prévention des blessures, l'optimisation de la performance et l'assistance à l'arbitrage. À travers une revue de littérature et une étude de cas en escrime, il montre que l'IA permet à la fois d'anticiper des risques, de personnaliser l'entraînement et de renforcer la cohérence des décisions arbitrales. Toutefois, son déploiement soulève des enjeux méthodologiques (robustesse, qualité des données), sociaux (acceptabilité, transformation des rôles) et éthiques (équité, confidentialité). L'étude conclut que l'IA constitue un outil puissant mais qu'elle doit rester centrée sur l'humain, afin de préserver la santé, l'équité et l'essence du sport.

**Mots-clés :** Intelligence Artificielle, Sport, Prévention des Blessures, Optimisation de la Performance, Arbitrage, Vision par Ordinateur, Jumeaux Numériques, Éthique

# Abstract

This thesis examines the role of artificial intelligence (AI) in sports through three main dimensions: injury prevention, performance optimization, and refereeing assistance. Drawing on a literature review and a case study in fencing, it demonstrates how AI can anticipate risks, personalize training, and enhance the consistency of refereeing decisions. However, its deployment raises methodological (robustness, data quality), social (acceptance, role transformation), and ethical (fairness, privacy) challenges. The study concludes that AI is a powerful tool, but it must remain human-centered in order to preserve athletes' health, competitive fairness, and the essence of sport itself.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Sports, Injury Prevention, Performance Optimization, Refereeing, Computer Vision, Digital Twins, Ethics

<b>1. Introduction.....</b>	<b>7</b>
1.1. Contexte général.....	7
1.2. Enjeux actuels du sport.....	8
1.3. Expérience personnelle.....	8
1.4. L'émergence de l'intelligence artificielle comme réponse.....	9
1.5. Problématique et question de recherche.....	10
<b>2. Cadre théorique et état de l'art.....</b>	<b>10</b>
2.1. Définitions et concepts de base.....	10
2.2. L'intelligence artificielle dans le sport : état de l'art.....	13
2.3. Défis et limites.....	16
<b>3. L'intelligence artificielle pour la prévention des blessures.....</b>	<b>19</b>
3.1. Les blessures dans le sport : un enjeu majeur.....	19
3.2. L'IA comme outil de détection précoce.....	21
3.3. Études de cas : musculation et squat.....	23
3.4. Les défis méthodologiques : données et généralisation.....	26
3.5. Vers une prévention personnalisée.....	28
3.6. Limites et enjeux éthiques.....	30
3.7. Perspectives.....	32
<b>4. L'intelligence artificielle pour l'optimisation de la performance.....</b>	<b>34</b>
4.1. Performance sportive : définitions et enjeux.....	34
4.2. Revue de littérature : modèles et approches.....	36
4.3. Applications concrètes.....	38
4.4. Discussion : apports et limites.....	40
<b>5. L'intelligence artificielle pour l'assistance à l'arbitrage.....</b>	<b>42</b>
5.1. L'arbitrage sportif : un rôle central mais controversé.....	42
5.2. Revue de littérature.....	44
5.3. Étude de cas : l'escrime et l'entretien avec le Maître David Bucquet.....	47
5.4. Discussion et acceptabilité sociale.....	50
5.5. Perspectives.....	52
<b>6. Discussion transversale.....</b>	<b>55</b>
6.1. Comparaison des trois axes.....	55
6.2. Convergences et divergences.....	57
6.3. Enjeux éthiques, sociaux et technologiques.....	60
6.4. Perspectives globales.....	62
<b>7. Conclusion.....</b>	<b>65</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>68</b>
Articles scientifiques.....	68
Rapports & institutions.....	69
Podcasts & conférences.....	69
Ouvrages académiques.....	70

# 1. Introduction

## 1.1. Contexte général

Depuis plusieurs décennies, le sport de haut niveau comme la pratique amateur connaissent une transformation profonde sous l'effet du numérique. L'essor des technologies de suivi et de mesure a bouleversé la manière d'entraîner, de contrôler la charge de travail et d'évaluer les performances des athlètes. Chronomètres, capteurs de fréquence cardiaque, systèmes GPS et plateformes de suivi biométrique ont progressivement intégré l'arsenal des entraîneurs, médecins et analystes.

Dans ce mouvement, la donnée est devenue centrale. Chaque geste, chaque déplacement, chaque variation physiologique peut désormais être enregistré et analysé. Les clubs professionnels disposent de véritables bases de données de performance, permettant de comparer les joueurs, de prévenir les baisses de forme ou d'adapter l'entraînement en temps réel. Cette transformation n'a pas seulement concerné l'athlète : l'arbitrage et le spectacle sportif se sont eux aussi dotés de technologies, comme la vidéo-assistance (VAR), le "hawk-eye" dans le tennis ou la détection semi-automatisée du hors-jeu au football.

Cependant, ces outils restent fondamentalement descriptifs et nécessitent toujours une interprétation humaine. Ils mesurent, enregistrent et illustrent, mais peinent à traiter la complexité des interactions motrices et contextuelles du sport moderne. C'est précisément dans cette zone de limite qu'intervient aujourd'hui l'intelligence artificielle (IA).

## 1.2. Enjeux actuels du sport

L'IA s'inscrit dans un contexte où les enjeux sportifs dépassent largement la simple recherche de performance brute.

- **La performance** reste un objectif central, surtout dans le sport de haut niveau, où la différence entre un podium et une élimination peut se jouer sur des détails imperceptibles à l'œil humain. Les entraîneurs cherchent des outils capables de donner une vision fine de l'état d'un athlète, d'identifier ses points faibles et d'optimiser son potentiel.
- **La santé et la prévention des blessures** sont devenues un enjeu majeur. Les carrières sont souvent fragilisées par des blessures répétées, qui peuvent être liées à une mauvaise technique, à une surcharge d'entraînement ou à une mauvaise récupération. La possibilité de prédire et prévenir ces blessures à partir de modèles de données constitue une révolution potentielle.

- **L'arbitrage** est au cœur de l'équité sportive. Les litiges fréquents et la vitesse croissante des sports modernes rendent difficile le jugement objectif et immédiat des arbitres. Les technologies d'assistance ont déjà marqué une étape, mais elles restent perfectibles et suscitent parfois la polémique. L'IA promet ici une aide précieuse : elle pourrait analyser instantanément des séquences complexes, détecter des fautes ou confirmer une décision, réduisant ainsi les contestations.

Ces trois dimensions – performance, santé, arbitrage – sont aujourd'hui considérées comme les piliers de l'évolution du sport moderne. Mais elles révèlent aussi les limites des outils traditionnels, qui peinent à aller plus loin dans la précision, la réactivité et la personnalisation.

### 1.3. Expérience personnelle

Depuis mon plus jeune âge, j'ai eu la chance de côtoyer le monde du sport au plus près. De mes quatre ans jusqu'à mes vingt ans, j'ai pratiqué l'escrime, d'abord comme activité de loisir, puis de manière compétitive dès l'adolescence. Très vite, ce sport est devenu pour moi bien plus qu'une simple discipline : il a représenté une école de rigueur, de stratégie et de dépassement de soi. En m'impliquant dans les compétitions à partir de treize ans, j'ai pu comprendre à quel point la performance et la gestion de la pression sont intimement liées dans le sport de haut niveau.

Mon parcours m'a aussi sensibilisé au rôle central de l'arbitrage. Que ce soit dans l'encadrement des plus jeunes, lors des premières compétitions locales, ou sur des rencontres à forts enjeux, j'ai constaté que toute la dynamique d'un match repose en grande partie sur la figure de l'arbitre. Dans un sport où tout se joue en une fraction de seconde, sa capacité à prendre une décision juste et immédiate conditionne non seulement le résultat, mais aussi la perception d'équité par les athlètes et par le public. Cette expérience m'a permis de mesurer à quel point l'arbitrage constitue la clé de voûte de l'organisation sportive : il est garant de la régularité de l'épreuve et de la confiance des participants.

En parallèle, j'ai eu l'opportunité de côtoyer le haut niveau national et international. À l'âge de seize ans, j'ai réussi à intégrer le top 70 mondial de ma catégorie, ce qui m'a offert une exposition privilégiée à l'intensité des compétitions de prestige. Vivre ce niveau d'exigence m'a donné un aperçu concret des sacrifices nécessaires pour progresser, ainsi que des marges infimes qui séparent la victoire de la défaite.

D'autre part, mon intérêt ne s'est jamais limité à ma seule pratique. Passionné de sport sous toutes ses formes, j'ai toujours aimé observer les disciplines où la performance est directement conditionnée par la technologie, comme les sports mécaniques. Dans ces univers, les innovations technologiques ne représentent pas un simple outil, mais deviennent un facteur déterminant de la réussite. Cela a renforcé mon intérêt pour la manière dont science et performance sportive peuvent s'enrichir mutuellement.

Enfin, plus récemment, la musculation est venue compléter mon parcours. En me lançant dans cette pratique en 2021, j'ai découvert un autre pan du sport : celui de la prévention des blessures et du suivi individualisé. La musculation m'a montré à quel point les outils technologiques – applications de suivi, capteurs de performance, plateformes d'analyse – jouent un rôle essentiel pour accompagner la progression tout en réduisant les risques physiques. Cette expérience, plus personnelle, m'a sensibilisé à la fragilité du corps face à l'effort et à l'importance d'anticiper les blessures plutôt que de seulement les soigner.

## 1.4. L'émergence de l'intelligence artificielle comme réponse

Dans ce contexte de besoins croissants et de limites atteintes par les technologies classiques, l'intelligence artificielle apparaît comme un prolongement naturel. Grâce à ses capacités de traitement massif de données et de reconnaissance de motifs complexes, l'IA peut dépasser les simples outils descriptifs pour fournir de véritables **aides à la décision**.

Plusieurs exemples récents en témoignent :

- Dans le domaine de la **prévention des blessures**, la National Football League (NFL) a développé le projet "Digital Athlete", un modèle d'IA nourri par des milliers d'heures de vidéos et de capteurs, destiné à simuler des millions de scénarios de jeu afin d'identifier les situations à risque et proposer des ajustements d'entraînement.
- Pour l'**optimisation de la performance**, des travaux scientifiques récents intègrent à la fois des données physiologiques, biomécaniques et psychologiques dans des modèles prédictifs. Ces approches permettent de personnaliser l'entraînement, d'anticiper la fatigue et d'améliorer la préparation mentale et physique de l'athlète.
- Concernant l'**arbitrage**, la FIFA a introduit la technologie semi-automatisée du hors-jeu lors de la Coupe du monde 2022, combinant caméras optiques et IA pour signaler en temps réel les situations litigieuses. Dans la gymnastique, le partenariat avec Fujitsu a permis de développer un système d'arbitrage assisté par IA capable d'analyser la posture des athlètes avec une précision inédite.

Ces applications montrent que l'IA ne se limite pas à la théorie : elle s'implante progressivement dans le sport professionnel, avec des résultats tangibles.

## 1.5. Problématique et question de recherche

Ces évolutions posent néanmoins une question essentielle : l'IA est-elle réellement capable d'apporter des réponses concrètes et fiables aux défis du sport moderne, ou bien ne fait-elle qu'ajouter une couche technologique supplémentaire ?

C'est cette interrogation qui conduit à la problématique de ce mémoire :

**En quoi l'analyse du mouvement par intelligence artificielle peut-elle prévenir les blessures, améliorer la performance et assister l'arbitrage dans le sport ?**

Cette problématique met en évidence trois axes d'exploration complémentaires : la prévention des blessures, l'optimisation de la performance et l'assistance à l'arbitrage

## 2. Cadre théorique et état de l'art

### 2.1. Définitions et concepts de base

#### 2.1.1. Intelligence artificielle : origines, courants et positions

L'intelligence artificielle (IA) désigne l'ensemble des techniques et méthodes qui visent à conférer à des systèmes informatiques des capacités considérées comme « intelligentes » lorsqu'elles sont réalisées par des humains : percevoir, raisonner, apprendre, décider. Ses origines remontent aux années 1950, avec les travaux fondateurs d'Alan Turing sur la machine universelle et le fameux « test de Turing », ainsi qu'à la conférence de Dartmouth (1956) qui posa les bases du champ en tant que domaine de recherche structuré.

Deux grandes familles se sont ensuite distinguées. La première, l'IA **symbolique**, repose sur la manipulation de règles explicites et de représentations logiques. Elle a donné naissance aux systèmes experts des années 1970–1980, capables de résoudre des problèmes dans des domaines spécifiques en exploitant des bases de connaissances formalisées. La seconde, l'IA **connexionniste**, s'appuie sur des réseaux neuronaux artificiels capables d'apprendre à partir des données et de généraliser à de nouvelles situations. C'est cette seconde voie qui, avec la montée en puissance du deep learning à partir de 2012, a profondément transformé les usages de l'IA, notamment dans le sport.

Les réseaux convolutifs (CNN) ont révolutionné l'analyse d'images et de vidéos, ouvrant la voie à la détection automatique de gestes ou de postures. Les architectures séquentielles (RNN, LSTM) et, plus récemment, les Transformers, permettent de modéliser la dimension temporelle des séquences sportives, en intégrant la dynamique d'un geste ou d'un enchaînement d'actions collectives. Une distinction fondamentale s'impose également entre **IA faible** et **IA forte** : la première est spécialisée dans une tâche précise (par exemple, détecter un genou qui s'affaisse lors d'un squat), tandis que la seconde viserait une intelligence générale, capable de s'adapter à de multiples domaines — cette dernière restant hypothétique. Dans la pratique sportive, seules des IA faibles sont déployées, mais leur rapidité et leur précision les rendent déjà stratégiques pour l'entraînement, la prévention et l'arbitrage.

#### 2.1.2. Apprentissage automatique : paradigmes et usages

L'apprentissage automatique (machine learning) constitue le cœur des applications de l'IA dans le sport. Il repose sur l'idée qu'un modèle peut apprendre des régularités à partir de données, plutôt que d'être programmé explicitement. Plusieurs paradigmes coexistent :

- **Apprentissage supervisé** : le modèle apprend à partir d'exemples étiquetés. Il peut s'agir, par exemple, de classer un squat comme correct ou incorrect, ou de prédire la probabilité de blessure en fonction de données biomécaniques.
- **Apprentissage non supervisé** : ici, les données ne sont pas annotées. L'objectif est de découvrir des structures cachées, comme le regroupement de profils d'athlètes ou la détection de patterns dans la charge d'entraînement.
- **Apprentissage semi-supervisé et auto-supervisé** : ces méthodes permettent d'exploiter de grandes quantités de données non annotées, ce qui est particulièrement utile dans l'analyse vidéo, où l'annotation manuelle est coûteuse et chronophage.
- **Apprentissage par renforcement** : le modèle apprend en interagissant avec un environnement et en maximisant une récompense. Dans le sport, cela ouvre des perspectives pour l'optimisation des stratégies en sports collectifs ou pour la gestion de l'effort en endurance.
- **Transfert de connaissances et adaptation de domaine** : un modèle pré-entraîné sur une tâche (par exemple la reconnaissance de poses humaines) peut être adapté à un autre contexte, comme une nouvelle discipline ou des conditions d'éclairage différentes.
- **Apprentissage actif** : le modèle identifie lui-même les exemples les plus informatifs et sollicite leur annotation par un humain, ce qui réduit le coût global d'étiquetage.

La chaîne de valeur d'un projet typique inclut plusieurs étapes : la **collecte des données** (via capteurs, vidéos, GPS ou unités de mesure inertielle), leur **synchronisation** et leur **prétraitement** (filtrage du bruit, interpolation des données manquantes, normalisation), l'**extraction de caractéristiques** (angles articulaires, vitesses segmentaires, indices de variabilité), puis la **modélisation** (régression, SVM, forêts aléatoires, réseaux neuronaux profonds). Les modèles doivent être **validés** (par cross-validation ou sur un jeu externe), puis **déployés** en production, ce qui suppose un suivi de leur performance dans le temps, un ré-entraînement programmé et une journalisation des résultats.

Un enjeu majeur est celui de la **temporalité** : dans le sport, il faut savoir choisir la bonne fenêtre d'analyse, aligner correctement les signaux multimodaux et agréger les données sans perdre de finesse. D'autres défis incluent l'équilibrage des classes (les blessures étant beaucoup plus rares que les gestes corrects) et la représentativité des données, qui conditionnent la robustesse des modèles.

### 2.1.3. IA explicable, incertitude et équité



L'IA explicable (XAI) occupe une place croissante dans le domaine sportif. L'enjeu est de rendre compréhensibles des modèles souvent opaques, comme les réseaux neuronaux profonds. Pour cela, diverses méthodes existent : les cartes de saillance (Grad-CAM) qui indiquent les zones de l'image ayant influencé la décision, les outils d'explication locale comme LIME ou SHAP pour les données tabulaires, ou encore des approximations par arbres de décision pour simplifier une logique complexe.

Dans un contexte où la **santé**, la **sécurité** et l'**équité** sont en jeu, l'explicabilité devient un impératif. Il ne suffit pas qu'un modèle signale un risque de blessure : il doit préciser pourquoi, en indiquant par exemple que l'angle du genou dépasse un seuil critique ou qu'une asymétrie gauche/droite est trop marquée. De même, en arbitrage, un système doit pouvoir justifier pourquoi une touche a été validée ou non.

La **quantification de l'incertitude** est un autre aspect essentiel. Les prédictions devraient être assorties d'intervalles de confiance, afin d'éviter une interprétation binaire et de permettre aux entraîneurs ou arbitres d'évaluer le degré de fiabilité d'une recommandation. Enfin, la question de l'**équité** ne peut être éludée : il s'agit d'éviter que les modèles ne reproduisent des biais liés au sexe, à l'âge, au niveau ou au poste de jeu. Un modèle entraîné majoritairement sur des athlètes masculins d'élite ne peut être appliqué sans précaution à des sportives amateurs, sous peine de générer des erreurs systématiques.

#### 2.1.4. Vision par ordinateur et estimation de pose

La vision par ordinateur constitue la brique technique la plus visible et la plus utilisée dans l'IA appliquée au sport. Elle permet d'analyser automatiquement des images ou des vidéos pour en extraire des informations pertinentes. L'estimation de pose humaine est l'une des avancées les plus marquantes. Elle consiste à identifier des points clés du squelette (chevilles, genoux, hanches, épaules, coudes, poignets, etc.) et à reconstruire la posture en deux ou trois dimensions.

Deux grandes approches existent : les méthodes **top-down**, qui détectent d'abord la personne puis estiment sa pose, et les méthodes **bottom-up**, qui identifient directement les points clés avant de les regrouper en squelette. On distingue également les systèmes **monoculaires**, qui utilisent une seule caméra, et les systèmes **multi-caméras**, qui recourent à la stéréoscopie ou à la triangulation pour une meilleure précision. Enfin, certaines approches hybrides combinent la vision avec des capteurs inertiels (IMU), améliorant la robustesse en conditions réelles.

Des frameworks tels qu'**OpenPose**, **MediaPipe** (Google), **MoveNet** ou **BlazePose** ont popularisé ces méthodes. Plus récemment, la recherche s'oriente vers la **reconstruction de maillage humain en 3D** (« human mesh recovery »), qui permet d'obtenir une géométrie corporelle complète et plus stable pour l'estimation des angles articulaires. La segmentation d'instance, le suivi multi-objets (MOT) et la re-identification (ReID) complètent cet arsenal, notamment pour analyser des scènes collectives impliquant plusieurs joueurs.

Ces approches offrent deux avantages décisifs pour le sport : elles sont **non intrusives**, car elles ne nécessitent pas de capteurs fixés au corps, et elles sont **accessibles**, puisqu'un simple smartphone peut suffire. Cela ouvre la voie à une démocratisation de l'analyse biomécanique, y compris dans des environnements amateurs. L'estimation de pose sert de base à des modules d'analyse (cinématique, détection d'événements, évaluation technique) et alimente des systèmes d'aide à la décision utilisés pour l'entraînement, la prévention des blessures ou l'arbitrage.

## 2.2. L'intelligence artificielle dans le sport : état de l'art

### 2.2.1. IA et prévention des blessures

Les blessures sportives représentent l'un des enjeux majeurs de la performance, qu'il s'agisse de limiter les coûts économiques pour les clubs professionnels ou de préserver la santé et la motivation des pratiquants amateurs. Dans les sports collectifs de haut niveau, certaines études estiment que les blessures coûtent plusieurs centaines de millions d'euros par saison, en tenant compte des arrêts de joueurs, des traitements médicaux et de la diminution de la valeur marchande des athlètes. Dans le sport amateur, une blessure mal prise en charge peut entraîner l'abandon définitif de la pratique, avec des répercussions psychologiques et sociales importantes.

Les données mobilisées pour la prévention des blessures sont de plus en plus **multimodales**. Elles incluent :

- la **charge externe** (distances, vitesses, accélérations mesurées via GPS ou plateformes de force),
- la **charge interne** (fréquence cardiaque, variabilité cardiaque, lactate sanguin, perception subjective d'effort, sommeil),
- des indicateurs **biomécaniques** (angles articulaires, asymétries gauche/droite, ratios agonistes/antagonistes),
- l'**historique médical** (antécédents, délais de récupération, suivi post-blessure),
- le **contexte** (densité du calendrier, déplacements, conditions environnementales comme la chaleur ou la qualité de la surface).

L'intelligence artificielle intervient pour analyser ces données complexes et repérer des **signaux faibles** qu'un entraîneur ou un médecin ne pourrait pas identifier à l'œil nu. Par exemple, une légère asymétrie dans la foulée, couplée à une fatigue accumulée et à un déficit de récupération, peut annoncer un risque de blessure musculaire. Des pipelines typiques incluent la capture vidéo d'un mouvement, l'estimation de pose, l'extraction de caractéristiques

cinématiques (profondeur d'un squat, valgus du genou, vitesse de la barre), puis la classification du geste grâce à des modèles supervisés comme XGBoost, CNN ou LSTM.

Des cas concrets confirment l'intérêt de ces approches. Dans le football, des modèles prédictifs identifient le risque de lésion ischio-jambiers en fonction des sprints à haute intensité et des changements de direction. Dans le basketball, l'IA suit la charge neuromusculaire liée aux sauts répétés et la met en relation avec la qualité du sommeil pour ajuster les volumes d'entraînement. Dans le rugby ou la NFL, des jumeaux numériques permettent de simuler des scénarios de contact et de recommander des ajustements sur l'équipement ou les règles. Enfin, en musculation, des systèmes simples basés sur MediaPipe ou MoveNet détectent automatiquement une profondeur insuffisante au squat ou un affaissement des genoux, fournissant un feedback immédiat à l'athlète.

Ces dispositifs présentent néanmoins plusieurs **limites méthodologiques**. Les données de blessures étant rares, les modèles risquent de produire trop de faux positifs. La variabilité interindividuelle pose également problème : un seuil global de risque ne s'applique pas forcément à tous les athlètes. De plus, la généralisation reste délicate : un modèle appris sur des footballeurs masculins d'élite ne sera pas forcément valide pour des athlètes féminines ou amateurs. Pour y remédier, certains chercheurs explorent la génération de **données synthétiques** grâce à des modèles génératifs (GAN, autoencodeurs variationnels), afin d'augmenter artificiellement la taille des jeux de données.

Enfin, la prévention par IA s'inscrit de plus en plus dans une **intégration clinique**. Loin de remplacer les kinésithérapeutes ou médecins du sport, ces systèmes deviennent des outils de dépistage continu et d'objectivation des progrès. L'IA fournit des mesures précises (amplitudes articulaires, symétries, temps de réaction) qui peuvent être discutées en équipe pluridisciplinaire. La transparence des recommandations (explications visuelles, seuils clairs) reste un enjeu crucial pour garantir l'acceptabilité.

### 2.2.2. IA et optimisation de la performance

Si la prévention des blessures vise à protéger la santé des athlètes, l'optimisation de la performance a pour objectif de les amener à exprimer leur plein potentiel. Dans ce domaine, l'IA marque une rupture en passant d'une logique **descriptive** (constater une performance) à une logique **prescriptive** (recommander des ajustements individualisés).

Les modèles utilisés combinent des données **physiologiques** ( $\text{VO}_2$  max, lactate, fréquence cardiaque), **mécaniques** (puissance, cadence), **psychologiques** (motivation, résilience, stress perçu) et **contextuelles** (conditions environnementales, calendrier des compétitions). Les architectures hybrides, mêlant réseaux neuronaux profonds et modèles tabulaires, permettent de capturer les interactions complexes entre ces dimensions. Les sorties prennent souvent la forme de recommandations personnalisées : augmenter la charge d'entraînement, réduire l'intensité, privilégier la récupération, avec une estimation probabiliste du gain attendu.

Les exemples concrets sont nombreux. En cyclisme et en course à pied, des modèles prédictifs ajustent le pacing en fonction du terrain et des conditions climatiques, tout en optimisant la nutrition et l'hydratation. En natation, l'IA analyse le cycle de bras sous l'eau pour détecter une perte d'efficacité propulsive et proposer des corrections techniques. En tennis, elle identifie des schémas tactiques récurrents dans les échanges et suggère des stratégies de ciblage. Dans les sports collectifs, les algorithmes reconnaissent des structures défensives (pressing, bloc médian) et anticipent les zones exploitables en match. Enfin, en musculation, la mesure de la vitesse de la barre (VBT) permet de prédire la charge maximale quotidienne et d'ajuster automatiquement le programme d'entraînement.

Une innovation majeure réside dans le développement des **jumeaux numériques** d'athlètes. Ces avatars virtuels intègrent des données biomécaniques, physiologiques et psychologiques pour simuler l'impact d'une séance, d'un micro-cycle ou d'une stratégie de compétition. Ils permettent de tester virtuellement différentes hypothèses avant de les mettre en œuvre sur le terrain. Dans les sports mécaniques, ces modèles servent déjà à optimiser les trajectoires, le choix des pneus ou la stratégie de ravitaillement. Dans les sports d'endurance, ils anticipent les effets d'une charge supplémentaire ou d'une modification du sommeil.

Toutefois, l'optimisation de la performance par IA rencontre aussi des limites. La **complexité des modèles** peut freiner leur adoption : les entraîneurs n'ont pas toujours les compétences pour interpréter les résultats. Les **biais de données** posent également problème : un modèle entraîné sur des athlètes de haut niveau n'est pas directement applicable à des amateurs. Enfin, la **question de l'équité** demeure : un athlète bénéficiant d'un suivi par IA avancé dispose-t-il d'un avantage injuste sur ses concurrents ?

À court terme, il est probable que l'IA s'intègre de plus en plus dans les applications mobiles et les capteurs portables déjà utilisés par les sportifs. À moyen terme, les jumeaux numériques pourraient devenir des standards dans le suivi d'élite. À long terme, on peut envisager une intégration globale, où des systèmes d'IA analyseraient simultanément les aspects physiques, psychologiques et tactiques pour fournir une aide à la décision complète et en temps réel.

### 2.2.3. IA et arbitrage assisté

L'arbitrage constitue un troisième champ d'application majeur de l'IA dans le sport. Contrairement à la prévention et à la performance, il ne concerne pas directement l'athlète mais l'**environnement compétitif**. L'objectif est de renforcer l'équité des compétitions en réduisant l'erreur humaine et en augmentant la transparence des décisions.

Plusieurs technologies ont déjà été déployées. Dans le football, la vidéo assistance à l'arbitrage (VAR) et le hors-jeu semi-automatisé introduit lors de la Coupe du monde 2022 combinent des caméras multacentrales et un capteur dans le ballon. L'IA reconstruit en 3D la position des joueurs et transmet une alerte en quelques secondes aux arbitres vidéo. Dans le tennis, Hawk-Eye est désormais utilisé pour arbitrer automatiquement certaines compétitions, avec une acceptabilité élevée de la part des joueurs et du public. En cricket et en baseball, les zones de lancer ou de frappe sont modélisées et présentées sous forme visuelle. En rugby, le TMO

(Television Match Official) est épaulé par des analyses vidéo avancées pour évaluer la dangerosité des contacts. En gymnastique, la Fédération internationale collabore avec Fujitsu pour attribuer des notes basées sur une analyse biomécanique objective. Enfin, en escrime, des projets explorent la possibilité de détecter automatiquement les touches et de résoudre les actions simultanées grâce à la vision par ordinateur.

Si les apports sont indéniables, plusieurs défis subsistent. Le premier concerne la **fluidité du jeu** : trop d'interruptions brisent le rythme et nuisent au spectacle. Le deuxième est la **transparence** : les décisions de l'IA doivent être compréhensibles par le public, au risque d'être perçues comme arbitraires. Le troisième concerne la **légitimité de l'arbitre** : si la machine décide seule, le rôle symbolique de l'arbitre est remis en cause. Enfin, des questions techniques persistent : robustesse en conditions réelles (occlusions, luminosité variable), gestion des cas limites (« edge cases »), interopérabilité entre systèmes et certification indépendante.

Ainsi, l'IA appliquée à l'arbitrage oscille entre deux modèles. Le premier est celui de **l'assistance à l'humain**, où l'IA aide mais laisse la décision finale à l'arbitre (comme au football). Le second est celui de la **substitution partielle**, où l'IA prend une part active dans la décision (comme en gymnastique ou au tennis). Le choix entre ces deux modèles dépend autant de la faisabilité technique que de l'acceptabilité sociale et institutionnelle.

## 2.3. Défis et limites

Si les avancées de l'intelligence artificielle appliquée au sport sont indéniables, leur diffusion généralisée se heurte à plusieurs obstacles, à la fois techniques, méthodologiques, éthiques et sociaux. Ces défis conditionnent l'acceptabilité et la durabilité de ces technologies.

### 2.3.1. Robustesse et transfert en conditions réelles

Les systèmes d'IA entraînés dans des environnements contrôlés rencontrent des difficultés dès lors qu'ils sont confrontés aux conditions fluctuantes des compétitions sportives. Les variations d'éclairage, les mouvements non standardisés, les occlusions visuelles (joueurs qui se chevauchent, obstacles), ou encore le bruit dans les données capteurs compromettent la fiabilité des modèles. Un algorithme performant en laboratoire peut ainsi échouer en match réel, où les paramètres sont beaucoup plus instables.

Le défi consiste donc à développer des modèles robustes, capables de généraliser à des contextes variés et de maintenir un niveau de performance acceptable en situation de compétition. Cela suppose de travailler sur des stratégies de régularisation, de collecte de données diversifiées et de tests en conditions dégradées.

### 2.3.2. Dépendance aux données et représentativité

La performance des modèles dépend directement de la qualité, de la quantité et de la représentativité des données. Or, dans le sport, les bases de données sont souvent limitées.

Les blessures, par exemple, constituent des événements relativement rares, entraînant un fort déséquilibre entre classes et donc un risque de sur-apprentissage. De même, de nombreux modèles sont entraînés sur des athlètes masculins de haut niveau, alors qu'ils sont ensuite appliqués à des publics différents (femmes, amateurs, jeunes).

Cette dépendance aux données pose des problèmes de biais systématiques. Par exemple, un modèle de détection de postures mal entraîné peut sous-performer sur certaines morphologies ou certaines conditions de luminosité. Les stratégies de collecte inclusive, l'utilisation de données synthétiques générées par IA, et la mise en place de protocoles multi-sites sont des leviers indispensables pour pallier ces biais.

### **2.3.3. Explicabilité, confiance et adoption**

L'acceptabilité des systèmes d'IA par les entraîneurs, les arbitres et les athlètes repose en grande partie sur leur **explicabilité**. Un modèle qui recommande une réduction de charge ou valide une décision arbitrale doit pouvoir justifier son raisonnement. Sans transparence, la confiance reste limitée et les recommandations risquent d'être ignorées.

L'IA explicable (XAI) constitue une piste prometteuse : cartes de saillance pour identifier les zones d'intérêt sur une vidéo, méthodes d'explication locale comme LIME ou SHAP pour les modèles tabulaires, règles dérivées pour résumer un processus décisionnel complexe. De plus, la quantification de l'incertitude est cruciale : fournir un degré de confiance dans une prédiction permet à l'humain de relativiser la recommandation et d'exercer son propre jugement.

### **2.3.4. Enjeux éthiques et juridiques**

La collecte massive de données biométriques soulève des questions de confidentialité et de gouvernance. Les vidéos, les signaux physiologiques ou les historiques médicaux constituent des données sensibles, susceptibles d'être exploitées à des fins commerciales ou discriminatoires. Qui détient réellement ces données : l'athlète, le club, la fédération ou l'entreprise technologique qui fournit le service ?

À cela s'ajoute la question de la responsabilité. Si une IA recommande un repos forcé et que l'athlète ignore cette recommandation puis se blesse, qui est responsable ? À l'inverse, si l'athlète suit la recommandation mais que celle-ci s'avère erronée, la responsabilité incombe-t-elle au club, à l'entraîneur ou au fournisseur de technologie ? Ces zones grises nécessitent des régulations claires et une gouvernance éthique.

### **2.3.5. Acceptabilité sociale et symbolique**

Le sport repose sur une dimension humaine forte, où l'arbitre est perçu comme garant de l'équité et l'entraîneur comme figure d'autorité. L'intégration d'IA soulève donc des questions symboliques. Dans l'arbitrage, le risque est de transformer l'arbitre en simple « validateur » de décisions automatisées, ce qui pourrait fragiliser son rôle. Dans l'entraînement, certains sportifs

redoutent une déshumanisation de la relation avec leur coach, remplacée par un suivi algorithmique impersonnel.

De plus, le public lui-même peut se montrer réticent. L'introduction de la vidéo et de l'IA en football a par exemple été critiquée pour ses interruptions et pour le sentiment de perte de spontanéité. La pédagogie, la transparence et l'adaptation progressive apparaissent comme des conditions nécessaires pour favoriser l'acceptabilité.

### 2.3.6. Coût et inégalités d'accès

Les technologies d'IA avancées reposent souvent sur des infrastructures coûteuses : systèmes multcaméras, serveurs de calcul intensif, dispositifs de stockage vidéo. Elles restent donc concentrées dans les clubs professionnels riches et dans les disciplines médiatisées. Les structures amateurs et les sports confidentiels risquent de rester en marge, renforçant les inégalités technologiques.

Des pistes existent pour réduire ces écarts : solutions « smartphone-first », modèles allégés exécutables en périphérie (edge computing), logiciels open source, protocoles de calibration à faible coût. Mais l'écart entre sport professionnel et sport amateur reste pour l'instant un frein important à la démocratisation.

### 2.3.7. Durabilité et empreinte environnementale

Enfin, la question environnementale commence à émerger. L'entraînement de grands modèles de deep learning consomme énormément d'énergie, tout comme le stockage et l'analyse de flux vidéo en continu. Dans un contexte de transition écologique, il devient nécessaire de concevoir des architectures plus sobres, de privilégier des modèles compacts et de réfléchir à l'empreinte carbone des technologies appliquées au sport.

### 2.3.8. Perspectives

Les recherches actuelles se concentrent sur plusieurs pistes :

- améliorer la **fusion multimodale** (vision, capteurs inertiels, signaux physiologiques) pour obtenir des analyses robustes,
- développer des approches de **personnalisation systématique** (meta-learning, fine-tuning) pour adapter les modèles à chaque athlète,
- recourir à des **modèles génératifs** afin de simuler des données rares, notamment pour les blessures,
- renforcer l'**IA explicable** afin de proposer des explications simples et auditable aux utilisateurs,

- mettre en place des pratiques de **MLOps sportifs** (supervision continue, détection de dérive, documentation complète des modèles) pour assurer un déploiement durable.

En résumé, l'IA dans le sport est passée d'une logique de mesure descriptive à une logique d'aide à la décision prescriptive. Ses applications touchent la prévention, la performance et l'arbitrage, mais sa généralisation reste freinée par des défis techniques, éthiques et sociaux. La résolution de ces défis conditionnera non seulement l'adoption au plus haut niveau, mais aussi la démocratisation au sein du sport amateur.

## 3. L'intelligence artificielle pour la prévention des blessures

### 3.1. Les blessures dans le sport : un enjeu majeur

Les blessures sportives constituent un problème central dans toutes les disciplines, quel que soit le niveau de pratique. Elles limitent la disponibilité des athlètes, perturbent les calendriers de compétition et freinent la progression individuelle. Sur le plan économique, elles représentent un enjeu colossal. Dans le football européen de haut niveau, l'UEFA estime que les blessures entraînent chaque année des pertes financières se chiffrant en centaines de millions d'euros, notamment à cause de l'indisponibilité des joueurs lors des compétitions majeures. Les clubs les plus riches, comme ceux de Premier League, peuvent perdre plusieurs millions d'euros de valeur marchande en quelques semaines lorsqu'une star est victime d'une rupture ligamentaire ou d'une lésion musculaire grave. Aux États-Unis, la NBA et la NFL enregistrent également un coût élevé : chaque match manqué par un joueur vedette entraîne une baisse de recettes billetterie, de revenus publicitaires et de performances sportives, ce qui illustre la fragilité économique des franchises vis-à-vis de la santé des athlètes.

Dans les sports olympiques, les enjeux sont différents mais tout aussi cruciaux. Pour un sprinteur ou un gymnaste, une blessure à quelques mois des Jeux peut signifier la fin d'un cycle de quatre années de préparation. Les athlètes de haut niveau consacrent en moyenne plusieurs milliers d'heures d'entraînement par an, et une lésion sérieuse peut anéantir cet investissement en quelques secondes. Le CIO (Comité International Olympique) estime que, sur une compétition olympique estivale, environ 10 % des athlètes subissent une blessure significative, dont la moitié est suffisamment grave pour empêcher une performance optimale. Dans des sports d'endurance comme le marathon, les blessures de surmenage (tendinites, fractures de fatigue, lésions musculaires chroniques) constituent la première cause d'abandon, représentant plus de 70 % des arrêts prolongés selon certaines études biomédicales.



Ces chiffres témoignent d'une réalité universelle : aucune discipline n'est épargnée. Les sports de contact (rugby, football américain, arts martiaux) présentent une forte incidence de traumatismes aigus, comme les commotions cérébrales ou les lésions ligamentaires. Les sports de répétition gestuelle (tennis, natation, aviron) sont plus exposés aux pathologies de surmenage liées à la répétition de mouvements spécifiques. Les sports mécaniques, quant à eux, confrontent les athlètes à des risques rares mais potentiellement catastrophiques en cas d'accident. Enfin, dans les sports de force comme l'haltérophilie ou la musculation, ce sont les erreurs techniques et le non-respect de la progressivité qui constituent les principaux vecteurs de blessures.

À côté de l'impact physique et économique, il ne faut pas négliger les dimensions psychologiques et sociales. Une blessure entraîne souvent une baisse de moral, une perte de confiance et, dans certains cas, un sentiment d'isolement par rapport au collectif. Les sportifs de haut niveau évoquent fréquemment la peur de la rechute comme un frein majeur au retour à la performance maximale. Chez les amateurs, le manque de suivi médical accentue encore ce risque : une entorse ou une tendinite mal soignée peut suffire à provoquer l'arrêt définitif de la pratique sportive. Au-delà de la douleur physique, l'impact identitaire est également important : pour un athlète, se blesser peut être vécu comme une remise en cause de sa légitimité ou de sa valeur.

Historiquement, la prévention reposait sur des méthodes empiriques. L'entraînement était ajusté en fonction de l'expérience de l'entraîneur, de la perception des charges par les athlètes et d'un suivi médical limité aux bilans périodiques. Cette approche a permis des avancées, mais elle montre aujourd'hui ses limites. Dans un contexte où les charges d'entraînement sont de plus en plus lourdes, où le calendrier des compétitions s'intensifie et où la performance se joue à quelques détails, les méthodes traditionnelles apparaissent insuffisantes. Un entraîneur, même expérimenté, ne peut observer simultanément tous les paramètres physiologiques, biomécaniques et psychologiques qui conditionnent l'apparition d'une blessure. De même, les bilans médicaux ponctuels, aussi utiles soient-ils, ne permettent pas un suivi continu et prédictif.

Trois piliers traditionnels sont néanmoins à rappeler. Premièrement, la préparation physique individualisée, visant à renforcer le corps et à corriger les déséquilibres musculaires, constitue une base indispensable. Deuxièmement, le suivi médical régulier, avec des tests fonctionnels, de mobilité et de force, permet de repérer des fragilités structurelles avant qu'elles ne s'aggravent. Troisièmement, l'observation attentive de l'entraîneur reste un outil précieux, car elle permet d'identifier certains signes visibles de fatigue ou de mauvaise technique. Cependant, ces méthodes reposent largement sur la subjectivité, l'expérience et la disponibilité humaine, et n'intègrent pas l'ensemble des données aujourd'hui générées par les nouvelles technologies.

C'est précisément dans ce contexte que l'intelligence artificielle se positionne comme un levier de transformation. En analysant massivement des données issues de capteurs, de vidéos et de bilans médicaux, elle offre la possibilité de repérer des patterns invisibles à l'œil nu et d'anticiper les risques bien en amont de leur manifestation. L'IA ne remplace pas l'entraîneur ni le médecin, mais elle leur apporte un outil d'aide à la décision, en transformant la prévention des

blessures d'une approche réactive vers une approche proactive et prédictive. L'enjeu n'est plus simplement de soigner après coup, mais d'agir en amont pour préserver la santé, prolonger la carrière et optimiser la performance sportive.

## 3.2. L'IA comme outil de détection précoce

La véritable valeur ajoutée de l'intelligence artificielle en prévention des blessures réside dans sa capacité à repérer ce que l'on appelle les **signaux faibles**. Ce sont des variations infimes, souvent imperceptibles à l'œil nu ou trop complexes pour être interprétées sans outils spécifiques, mais qui annoncent fréquemment un déséquilibre biomécanique ou une surcharge physiologique. Ces signaux ne sont pas nécessairement pathologiques en eux-mêmes, mais leur accumulation ou leur persistance constitue un facteur de risque qu'il est crucial de détecter à temps.

Dans le cadre de l'entraînement sportif, ces signaux faibles peuvent prendre de multiples formes. Chez un coureur, il peut s'agir d'une asymétrie très légère dans la durée des appuis au sol entre la jambe gauche et la jambe droite, mesurable uniquement avec des capteurs inertiels ou des caméras à haute fréquence. Chez un basketteur, une baisse progressive de la hauteur de saut mesurée à travers la puissance d'impulsion au cours d'une séance peut signaler une fatigue neuromusculaire croissante. Dans le cas d'un footballeur, un allongement quasi imperceptible du temps de décélération après un sprint répété peut trahir une surcharge musculaire. Ce type d'observation est hors de portée d'une détection purement humaine, mais devient accessible grâce à l'IA et aux modèles d'apprentissage automatique.

### 3.2.1. Approches algorithmiques

Les modèles utilisés pour détecter ces signaux reposent sur différents paradigmes. Les **forêts aléatoires** se révèlent performantes pour combiner des variables hétérogènes (biomécaniques, physiologiques, contextuelles) et hiérarchiser leur importance. Les **réseaux convolutifs (CNN)** sont employés lorsqu'il s'agit d'analyser directement des flux vidéo et d'en extraire automatiquement des caractéristiques (trajectoire articulaire, posture globale). Les **machines à vecteurs de support (SVM)**, plus anciennes, conservent une pertinence lorsque les bases de données sont relativement modestes, comme c'est souvent le cas dans les études cliniques ou universitaires. Les modèles séquentiels, tels que les **RNN** ou les **LSTM**, s'imposent lorsqu'il s'agit d'analyser l'évolution temporelle d'un signal, par exemple la variation quotidienne de la charge interne au cours d'une saison.

Ces modèles ne cherchent pas nécessairement à expliquer dans le détail le mécanisme lésionnel, mais plutôt à attribuer un **score de risque** à une configuration donnée. Ainsi, ils ne prétendent pas affirmer qu'une blessure surviendra, mais plutôt qu'un athlète présente une probabilité significativement plus élevée de subir un incident dans un certain délai si rien n'est modifié. L'objectif est d'alerter suffisamment tôt pour permettre une intervention, qu'il s'agisse d'un ajustement de la charge, d'un travail spécifique de renforcement ou d'un repos préventif.

### 3.2.2. Études et exemples concrets

La revue de Musat et al. (2024) illustre bien la diversité des approches déjà mises en œuvre. Dans leurs travaux, les chercheurs rapportent des modèles capables d'intégrer des données aussi variées que la charge d'entraînement (volume et intensité), des tests fonctionnels (sauts, flexions, courses), des données physiologiques (fréquence cardiaque, lactate sanguin) ou encore l'historique médical des athlètes. La robustesse de ces modèles tient justement à leur capacité à combiner ces différentes dimensions pour en dégager un indice global de vulnérabilité.

Un exemple particulièrement marquant provient du projet **Digital Athlete** développé par la NFL. Dans ce programme, chaque joueur est représenté sous forme de jumeau numérique intégrant ses données biomécaniques, physiologiques et médicales. L'IA peut alors simuler des millions de scénarios de jeu et déterminer quels types de chocs, d'angles ou de vitesses sont associés à un risque élevé de blessure. Ce type d'approche ne sert pas uniquement à la prévention individuelle, mais peut également avoir des conséquences collectives : certaines situations de jeu jugées dangereuses peuvent conduire à une révision des règles, comme cela a déjà été observé pour les plaquages à haut risque.

Dans d'autres sports, les applications se multiplient. En **athlétisme**, certains laboratoires utilisent des capteurs inertiels combinés à des algorithmes d'IA pour détecter les premiers signes de fractures de fatigue chez les coureurs de fond, en analysant de minuscules variations dans la répartition des charges. En **natation**, des systèmes de vision par ordinateur suivent la symétrie des mouvements de bras et la régularité des battements de jambes afin de détecter précocement les déséquilibres responsables de tendinites de l'épaule. Dans le **tennis**, des modèles prédictifs combinant données biomécaniques et volume de frappes par séance permettent de surveiller l'apparition des syndromes du coude. Dans le **rugby**, où la prévalence des commotions cérébrales est élevée, des modèles couplant vidéo et capteurs inertiels cherchent à identifier les impacts potentiellement dangereux en temps réel.

### 3.2.3. De la réactivité à la proactivité

Le passage de la prévention traditionnelle à une prévention assistée par IA marque un véritable changement de paradigme. Alors que l'approche classique reposait essentiellement sur la détection de symptômes déjà visibles (douleur, baisse de performance, altération de la technique flagrante), l'IA permet une **intervention pro-active** avant que le problème ne se manifeste de façon perceptible. Cela modifie également la dynamique entre entraîneurs, athlètes et staff médical : au lieu de réagir à une blessure, l'équipe peut adapter l'entraînement quotidien sur la base de probabilités, ce qui constitue un gain potentiel considérable en termes de santé et de performance.

### 3.2.4. Défis persistants

Cependant, l'utilisation de l'IA en détection précoce ne va pas sans difficultés. La précision des modèles dépend directement de la qualité et de la représentativité des données. Une asymétrie

détectée chez un athlète peut être normale pour lui et constituer un signe pathologique pour un autre. La variabilité interindividuelle impose donc une personnalisation progressive des modèles. De plus, le problème de la rareté relative des blessures demeure : les événements à prédire sont peu fréquents, ce qui complique l'entraînement des algorithmes. C'est pourquoi certains chercheurs explorent la voie des **données synthétiques** ou des **techniques de détection d'anomalies** pour pallier ces limitations.

### 3.3. Études de cas : musculation et squat

La musculation représente un terrain privilégié pour observer l'apport de l'intelligence artificielle dans la prévention des blessures, car elle repose sur des gestes répétitifs dont la qualité technique conditionne directement la sécurité de l'athlète. Parmi ces gestes, le **squat** occupe une place centrale. Exercice poly-articulaire par excellence, il mobilise simultanément les hanches, les genoux, les chevilles et la colonne vertébrale, tout en sollicitant la stabilité du tronc et des ceintures scapulaire et pelvienne. En raison de cette complexité, il constitue un modèle d'étude idéal pour les chercheurs souhaitant évaluer la pertinence des outils de vision par ordinateur et d'estimation de pose appliqués à la biomécanique.

#### 3.3.1. Détection automatisée des erreurs techniques

Dans plusieurs projets universitaires, des modèles basés sur **MediaPipe** ou **OpenPose** ont été utilisés pour analyser l'exécution du squat. Les algorithmes identifient les points clés du squelette (chevilles, genoux, hanches, épaules, coudes, poignets) puis reconstruisent les angles articulaires au fil du mouvement. Deux erreurs majeures sont ainsi détectées avec fiabilité :

1. **La profondeur insuffisante**, qui réduit l'efficacité du mouvement et peut provoquer un déséquilibre musculaire entre quadriceps et chaîne postérieure.
2. **L'affaissement des genoux vers l'intérieur (valgus dynamique)**, considéré comme l'un des principaux facteurs de risque de blessure ligamentaire, notamment pour le ligament croisé antérieur.

Ces deux défauts, lorsqu'ils ne sont pas corrigés, favorisent l'apparition de pathologies chroniques (tendinopathies, douleurs lombaires) ou aiguës (ruptures ligamentaires). L'IA permet non seulement de détecter leur occurrence mais aussi de mesurer leur intensité et leur fréquence, ce qui donne une valeur quantitative à des observations jusqu'ici qualitatives.

#### 3.3.2. Mesures complémentaires et indicateurs avancés

Au-delà de la profondeur et du valgus, l'IA permet d'analyser d'autres dimensions du squat :

- **La vitesse d'exécution**, qui reflète la fatigue neuromusculaire. Une baisse progressive de la vitesse moyenne à charge constante peut indiquer une surcharge.
- **Le timing inter-articulaire**, c'est-à-dire la coordination entre la flexion des hanches et celle des genoux. Une mauvaise synchronisation peut générer des contraintes excessives sur la région lombaire.
- **La symétrie entre membres**, mesurée par la comparaison des angles et des forces estimées entre la jambe gauche et la jambe droite. Des asymétries récurrentes constituent un facteur de risque élevé de blessure.
- **L'alignement du tronc**, dont l'inclinaison excessive peut accroître la pression sur les disques intervertébraux.

L'ensemble de ces indicateurs, lorsqu'ils sont combinés dans un modèle prédictif, fournit une image fine de la qualité technique de l'athlète et de son évolution au cours du temps.

### 3.3.3. Extension à d'autres exercices : bench press et deadlift

Si le squat constitue le cas d'école le plus étudié, les mêmes principes s'appliquent à d'autres mouvements fondamentaux.

- Au **bench press (développé couché)**, les erreurs fréquentes concernent la trajectoire de la barre (souvent en arc trop prononcé), l'instabilité des épaules et l'asymétrie de poussée entre les deux bras. L'IA, via l'analyse de pose, permet de repérer un déficit de stabilité scapulaire ou une asymétrie de trajectoire, deux facteurs associés aux tendinopathies de l'épaule.
- Au **deadlift (soulevé de terre)**, les modèles détectent le « dos rond » (flexion lombaire excessive), l'élévation trop rapide des hanches par rapport aux épaules, ou encore le verrouillage incomplet de la hanche. Ces erreurs sont des causes classiques de lombalgies ou de hernies discales. L'IA aide ici à différencier un schéma d'exécution sécurisé d'un schéma potentiellement dangereux, et fournit un feedback en temps réel à l'athlète.

### 3.3.4. Accessibilité et démocratisation

Un des atouts majeurs de ces approches est leur accessibilité. Là où la biomécanique nécessitait autrefois des laboratoires spécialisés, avec des caméras infra-rouges et des marqueurs placés sur le corps, il suffit aujourd'hui d'un **smartphone** pour capter un mouvement et obtenir une analyse. Cette démocratisation change profondément la donne. Les pratiquants amateurs, souvent dépourvus de suivi qualifié, peuvent bénéficier d'un outil qui les aide à corriger leurs erreurs avant qu'elles ne provoquent des blessures. Les entraîneurs de clubs

amateurs disposent d'un moyen supplémentaire pour évaluer objectivement la technique de leurs athlètes sans recourir à des infrastructures coûteuses. Enfin, pour les professionnels, ces technologies permettent un suivi à grande échelle, y compris lors de compétitions, où les contraintes logistiques interdisent la mise en place de laboratoires de terrain.

### 3.3.5. Apports pédagogiques et suivi longitudinal

Un autre avantage réside dans la **dimension pédagogique**. L'IA ne se limite pas à émettre un verdict binaire (« correct/incorrect ») mais fournit des informations exploitables. Par exemple, elle peut indiquer que la profondeur moyenne du squat est passée de 105° à 92° sur une période de trois semaines, ou que l'asymétrie entre la jambe gauche et la jambe droite s'est accrue de 3 % après une période d'entraînement intensif. Ces données objectives renforcent le dialogue entre l'entraîneur et l'athlète, facilitent l'ajustement individualisé des charges et permettent de documenter les progrès de manière quantitative.

Sur le plan longitudinal, les données collectées alimentent un **historique technique** propre à chaque athlète. Cet historique devient un outil précieux pour la prévention, car il permet d'identifier des tendances (perte progressive de mobilité, installation d'une asymétrie, baisse de vitesse chronique) qui seraient invisibles sur une seule séance. L'IA agit alors comme une mémoire externe, archivant les détails du geste et facilitant la comparaison avec des périodes antérieures.

## 3.4. Les défis méthodologiques : données et généralisation

Si l'IA promet une révolution dans la prévention des blessures, ses performances réelles dépendent de conditions méthodologiques exigeantes. Les modèles les plus sophistiqués ne peuvent produire des résultats fiables que si les données sur lesquelles ils reposent sont de qualité, représentatives et correctement annotées. Dans le domaine sportif, ces conditions sont rarement réunies, ce qui constitue un obstacle majeur à l'adoption généralisée des solutions d'IA.

### 3.4.1. La rareté et le déséquilibre des données

La première difficulté concerne la **rareté relative des blessures**. Par définition, un athlète passe beaucoup plus de temps à s'entraîner sans blessure qu'à subir un incident. Dans un dataset, cela se traduit par un déséquilibre marqué entre les classes « sans blessure » et « blessure ». Un modèle naïf pourrait ainsi atteindre une précision apparente de 95 % simplement en prédisant « pas de blessure » dans tous les cas, sans pour autant détecter les situations réellement problématiques. Ce phénomène de **classe majoritaire** est bien connu en machine learning et nécessite des techniques spécifiques : rééchantillonnage (oversampling des cas rares, undersampling des cas majoritaires), ajustement des fonctions de perte, ou recours à des algorithmes spécialisés dans la détection d'anomalies.

Un autre obstacle est la **qualité hétérogène des données**. Les mesures issues de capteurs peuvent être bruitées (interférences GPS, décalages temporels entre dispositifs, erreurs d'estimation de pose en cas de mauvaise luminosité). Les vidéos sont souvent enregistrées dans des conditions non standardisées, avec des angles ou des résolutions variables. Cette variabilité complique l'entraînement des modèles et impose des prétraitements coûteux en temps et en expertise.

### 3.4.2. L'annotation : un goulot d'étranglement

Un autre défi crucial réside dans l'**annotation des données**. Pour entraîner un modèle supervisé capable de détecter des erreurs techniques ou de prédire un risque, il faut disposer de labels fiables. Or, dans le sport, la définition d'un « mauvais geste » ou d'une « surcharge » est parfois sujette à interprétation. Les entraîneurs eux-mêmes peuvent diverger sur l'évaluation d'un mouvement, et la variabilité inter-experts réduit la robustesse des labels. Certains projets ont tenté de contourner ce problème en définissant des critères quantitatifs simples (par exemple, « angle de flexion inférieur à 90° »), mais cela ne couvre pas toujours la complexité de la technique sportive. La mise en place de protocoles d'annotation standardisés, impliquant plusieurs experts et des procédures de consensus, apparaît donc indispensable pour garantir la qualité des datasets.

### 3.4.3. La variabilité interindividuelle

La **variabilité entre individus** constitue un autre défi. Chaque athlète possède une morphologie, un historique de blessure, une tolérance à la charge et une technique qui lui sont propres. Un modèle entraîné sur des footballeurs masculins professionnels risque d'échouer lorsqu'il est appliqué à des joueuses, à des adolescents ou à des amateurs. De même, un mouvement considéré comme atypique pour un athlète peut être normal pour un autre. Cela signifie que les modèles doivent intégrer des mécanismes de personnalisation ou d'adaptation de domaine pour rester pertinents. Dans la pratique, cela peut passer par des approches de **transfer learning**, qui réutilisent un modèle pré-entraîné sur un large dataset et l'adaptent à une nouvelle population, ou par des algorithmes capables de s'auto-ajuster en fonction des données propres à un athlète.

### 3.4.4. Généralisation et robustesse

Le problème de la **généralisation** est l'un des plus critiques. Un modèle peut être très performant dans les conditions contrôlées d'un laboratoire, mais perdre en précision sur le terrain, où les conditions lumineuses, l'angle des caméras ou la qualité du signal diffèrent. Dans les sports collectifs, l'enchevêtrement des joueurs rend l'estimation de pose plus difficile. Dans les sports de plein air, les conditions climatiques introduisent un bruit supplémentaire. Les modèles doivent donc être testés sur des conditions variées, et non uniquement sur des scénarios idéalisés.

Pour garantir cette robustesse, les chercheurs recommandent l'utilisation de **protocoles de validation croisée multi-sites**. Cela consiste à entraîner un modèle sur les données d'une population (par exemple, des joueurs d'un club professionnel) et à l'évaluer sur une autre population (athlètes amateurs ou d'un autre club). Ce type de validation externe est plus exigeant mais reflète mieux la capacité réelle d'un modèle à se généraliser. Dans la pratique, peu d'études actuelles respectent ce standard, ce qui limite la confiance dans leurs conclusions.

### 3.4.5. Données synthétiques et simulation

Pour pallier le manque de données réelles, certains chercheurs explorent la génération de **données synthétiques**. Les autoencodeurs variationnels (VAE) ou les réseaux génératifs antagonistes (GAN) peuvent créer des séquences de mouvements artificiels qui enrichissent les datasets. Cette approche est prometteuse, mais elle soulève une question de validité : les données générées reflètent-elles réellement la complexité du geste sportif ? Un dataset enrichi artificiellement peut introduire des biais si les données synthétiques diffèrent trop des comportements observés en situation réelle. Malgré cela, cette voie reste une des plus prometteuses pour renforcer la robustesse des modèles sans multiplier les campagnes de collecte, coûteuses en temps et en moyens.

### 3.4.6. Explicabilité et calibrage

Un autre défi méthodologique concerne la **compréhension des modèles**. Les entraîneurs et les athlètes sont peu enclins à suivre une recommandation si elle ne peut pas être expliquée. Dire qu'un athlète présente « 73 % de risque de blessure » n'a pas de valeur pratique si l'on ne sait pas quels facteurs contribuent à cette estimation. C'est là qu'intervient l'**IA explicable (XAI)**, qui permet d'identifier les variables ayant le plus influencé la prédiction. L'enjeu n'est pas seulement académique : sans explicabilité, les modèles risquent d'être rejetés par les utilisateurs finaux, quelle que soit leur performance statistique.

Enfin, la question du **calibrage** des prédictions est essentielle. Un modèle peut avoir de bonnes performances globales mais surestimer systématiquement les risques. Or, une surestimation chronique conduit à des faux positifs et, à terme, à une perte de confiance dans l'outil. La calibration consiste à ajuster les prédictions pour que la probabilité annoncée reflète réellement la fréquence observée. Dans le sport, cette exigence est d'autant plus cruciale que les décisions prises sur la base des prédictions (repos, modification d'entraînement) ont des conséquences directes sur la carrière et la performance des athlètes.

## 3.5. Vers une prévention personnalisée

La prévention personnalisée représente sans doute l'un des apports les plus prometteurs de l'intelligence artificielle au domaine sportif. Alors que les approches traditionnelles reposent sur des protocoles génériques, fondés sur des moyennes statistiques ou des recommandations globales, l'IA ouvre la voie à une individualisation beaucoup plus fine. Chaque athlète réagit différemment à une charge d'entraînement, possède une morphologie singulière et présente un



historique médical particulier. Les modèles d'apprentissage automatique, en intégrant cette diversité, permettent de dépasser le « one size fits all » pour tendre vers une véritable **médecine de précision appliquée au sport**.

### 3.5.1; De la norme au profil individuel

Historiquement, la prévention reposait sur des seuils collectifs : ne pas dépasser un certain nombre de sprints par semaine, limiter la charge totale à un pourcentage donné du poids corporel, ou encore imposer un minimum de jours de récupération après un effort intense. Ces règles ont prouvé leur efficacité à large échelle, mais elles ignorent les spécificités individuelles. Certains athlètes tolèrent très bien des volumes élevés, tandis que d'autres présentent une vulnérabilité accrue à la surcharge. L'IA, en analysant les données propres à chaque sportif, permet de définir un **profil de tolérance personnalisé**. Ce profil évolue dans le temps en fonction de l'âge, de l'état de forme et des contraintes contextuelles.

### 3.5.2. Exemples par discipline

Les applications concrètes sont nombreuses.

- **Dans le basket-ball**, un joueur peut recevoir une alerte spécifique s'il présente un risque accru de tendinite rotulienne, en fonction de la charge de sauts cumulée et de son historique médical. L'IA peut signaler qu'une légère réduction de la charge de tir ou un travail de renforcement ciblé suffiraient à prévenir l'apparition de symptômes.
- **Chez les coureurs de fond**, l'analyse des données de foulée révèle parfois une asymétrie subtile entre les deux jambes. Un modèle personnalisé peut indiquer qu'au-delà d'un certain kilométrage hebdomadaire, cette asymétrie devient critique et augmente fortement le risque de blessure. L'entraîneur adapte alors la programmation pour éviter de franchir ce seuil.
- **En musculation**, un pratiquant peut recevoir un feedback visuel immédiat sur sa posture : l'IA identifie que son genou gauche s'affaisse légèrement vers l'intérieur lors de charges lourdes et recommande un exercice correctif spécifique pour renforcer les muscles stabilisateurs.
- **En natation**, des systèmes d'analyse automatisée détectent une perte progressive de symétrie dans le mouvement des bras. Chez certains nageurs, cette asymétrie est bénigne ; chez d'autres, elle constitue un signe précoce de tendinopathie de l'épaule. L'IA permet d'adapter la prévention à la vulnérabilité propre de chaque nageur.

### 3.5.3. Les jumeaux numériques

Une extension particulièrement intéressante de cette personnalisation est le concept de **jumeau numérique**. Il s'agit d'un modèle virtuel de l'athlète, construit à partir de ses données biomécaniques, physiologiques et médicales. Ce double numérique peut simuler différentes situations d'entraînement ou de compétition pour prédire la réaction de l'athlète réel. Ainsi, avant d'imposer une nouvelle charge ou de tester un exercice inhabituel, le staff peut en observer virtuellement les conséquences potentielles. Cette approche, déjà utilisée dans l'ingénierie industrielle, commence à être explorée dans le sport de haut niveau, notamment dans le football américain ou l'athlétisme. Elle offre une personnalisation extrême, puisque chaque décision repose sur la modélisation dynamique d'un individu et non sur des moyennes collectives.

#### **3.5.4. Boucles de rétroaction et auto-apprentissage**

L'un des atouts majeurs de l'IA est sa capacité à s'améliorer continuellement grâce aux boucles de rétroaction. Chaque fois qu'une recommandation est appliquée — par exemple, une réduction de charge ou un changement technique — et que ses effets sont mesurés, ces nouvelles données enrichissent le modèle. Progressivement, le système apprend non seulement à estimer le risque, mais aussi à identifier quelles interventions sont les plus efficaces pour cet athlète particulier. On passe ainsi d'une prévention générique à une **prévention adaptative**, où les recommandations s'ajustent automatiquement au fil du temps.

#### **3.5.5. Accessibilité et équité**

Un enjeu important est celui de l'**accessibilité**. La personnalisation de la prévention ne doit pas être réservée aux clubs professionnels disposant de moyens colossaux. Grâce aux progrès technologiques, il devient possible de mettre en œuvre des systèmes relativement simples — basés sur un smartphone et quelques capteurs abordables — pour fournir un suivi individualisé à des sportifs amateurs. Cela permet de démocratiser une prévention de qualité et de réduire l'écart entre sport d'élite et sport loisir. À terme, l'IA pourrait devenir un outil standardisé d'accompagnement, intégré aux applications de suivi d'entraînement déjà largement utilisées par les coureurs, cyclistes ou pratiquants de fitness.

#### **3.5.6. Vers une médecine sportive de précision**

La personnalisation ouvre enfin des perspectives cliniques majeures. Dans une logique de **médecine sportive de précision**, l'IA pourrait aider les médecins et kinésithérapeutes à anticiper l'évolution de pathologies chroniques, à identifier les moments critiques de rechute, ou encore à optimiser les protocoles de rééducation en fonction des réponses spécifiques de chaque patient. Là où les protocoles actuels reposent sur des étapes fixes, l'IA permettrait une adaptation en temps réel, ajustée à la progression et aux réactions de l'athlète. Ce niveau de personnalisation représente sans doute l'une des évolutions les plus importantes de la prévention dans les prochaines décennies.

### **3.6. Limites et enjeux éthiques**

L'intégration de l'intelligence artificielle dans la prévention des blessures ne va pas sans soulever de nombreux questionnements éthiques, sociaux et juridiques. Si ses bénéfices potentiels semblent considérables, la légitimité et la durabilité de son adoption dépendent de la manière dont ces enjeux seront pris en compte. L'IA n'est pas une technologie neutre : elle transforme les pratiques, redistribue les responsabilités et peut introduire de nouvelles formes d'inégalités.

### 3.6.1. Acceptabilité sociale et confiance

Un premier enjeu majeur est celui de l'**acceptabilité sociale**. Les athlètes peuvent percevoir la surveillance constante comme une intrusion dans leur intimité. Porter des capteurs en permanence, être filmé sous tous les angles ou voir ses données physiologiques analysées quotidiennement peut générer un sentiment de perte de contrôle. Pour certains sportifs, cette surveillance peut devenir anxiogène, notamment si chaque micro-variation est interprétée comme un risque potentiel. La stigmatisation est également un danger : être identifié par un algorithme comme « joueur fragile » ou « profil à risque » peut avoir des conséquences sur le moral, mais aussi sur la carrière professionnelle d'un athlète, en influençant ses opportunités de sélection ou de contrat.

La confiance dans la technologie dépend aussi de la **transparence des modèles**. Un entraîneur ou un médecin acceptera difficilement de reposer ses décisions sur un « score de risque » incompréhensible. Les athlètes eux-mêmes exigent des explications claires sur les conclusions de l'IA. L'explicabilité devient alors un enjeu de légitimité : une recommandation doit pouvoir être justifiée, même de façon simplifiée, pour être acceptée par les utilisateurs finaux.

### 3.6.2. Responsabilité et gouvernance

La question de la **responsabilité** est tout aussi cruciale. Si une IA recommande le repos d'un athlète mais que l'entraîneur choisit de le faire jouer, et que celui-ci se blesse, qui est responsable ? À l'inverse, si l'athlète est écarté par précaution et que son équipe perd un match important, qui assume cette décision ? Dans le cadre juridique actuel, la responsabilité incombe en dernier ressort aux acteurs humains (médecins, entraîneurs, clubs). Mais la montée en puissance de systèmes automatisés crée une zone grise, où la tentation pourrait exister de rejeter la faute sur la machine. Une gouvernance claire doit donc être définie : l'IA ne doit pas être un substitut de décision, mais un outil d'aide, et ses recommandations doivent être contextualisées et validées par des professionnels.

### 3.6.3. Confidentialité et protection des données

Un autre enjeu central est celui de la **confidentialité**. Les données utilisées en prévention sont parmi les plus sensibles qui soient : fréquences cardiaques, niveaux hormonaux, vidéos du corps en mouvement, informations médicales personnelles. Leur mauvaise utilisation, volontaire ou accidentelle, peut avoir des conséquences graves : perte de vie privée, exploitation commerciale, discriminations. En Europe, le **Règlement Général sur la Protection des**

**Données (RGPD)** impose des règles strictes en matière de consentement, de minimisation et de stockage sécurisé des données de santé. Dans le sport professionnel, la question de la propriété des données est particulièrement délicate : appartiennent-elles à l'athlète, au club qui les a collectées, ou à l'entreprise qui fournit la technologie ? Cette ambiguïté peut créer des tensions, notamment lorsque les données sont utilisées pour négocier des contrats ou évaluer la valeur marchande d'un joueur.

À l'échelle internationale, les cadres varient fortement. Aux États-Unis, la régulation est moins stricte, ce qui favorise l'innovation mais expose davantage à des abus. En Asie, certaines fédérations investissent massivement dans le suivi biométrique sans toujours garantir la protection de la vie privée. L'harmonisation internationale reste encore très lointaine, ce qui complique les collaborations entre clubs et fédérations de pays différents.

### 3.6.4. Équité et inégalités

L'utilisation de l'IA pose aussi la question de l'**équité** entre athlètes et disciplines. Les clubs professionnels des grandes ligues disposent des moyens financiers pour acquérir les systèmes les plus performants, recruter des data scientists et déployer des infrastructures complexes. À l'inverse, les clubs amateurs et les disciplines moins médiatisées peinent à accéder à ces technologies. Le risque est de créer un fossé croissant entre le sport d'élite et le sport de base, alors même que la prévention des blessures devrait bénéficier à tous. La démocratisation des outils légers (smartphones, capteurs low-cost, modèles embarqués) représente une piste pour limiter ces inégalités, mais elle reste encore insuffisante face aux écarts d'investissement.

### 3.6.5. Risques de dépendance technologique

Enfin, un dernier risque est celui de la **dépendance technologique**. Si entraîneurs et athlètes s'habituent à ne prendre de décisions qu'avec l'appui d'une IA, ils risquent de perdre progressivement leur autonomie d'analyse. Que se passe-t-il si le système tombe en panne, si les données ne sont pas disponibles, ou si le modèle se trompe ? La technologie doit rester un soutien, pas un substitut. Former les acteurs à utiliser l'IA de manière critique, en gardant un esprit d'analyse indépendant, sera un enjeu clé dans les années à venir.

## 3.7. Perspectives

L'intégration de l'intelligence artificielle dans la prévention des blessures n'en est encore qu'à ses débuts. Si les premiers résultats sont déjà prometteurs, les perspectives futures laissent entrevoir une transformation profonde des pratiques sportives, tant au niveau de l'entraînement que du suivi médical et de la gouvernance des disciplines. Ces perspectives peuvent être envisagées selon trois horizons temporels : le court terme, le moyen terme et le long terme.

### 3.7.1. À court terme : vers une assistance intégrée

Dans les prochaines années, l'IA devrait s'imposer comme un outil de **monitoring quotidien**, intégré aux plateformes d'entraînement et aux objets connectés déjà largement utilisés par les athlètes. Les montres GPS, ceintures cardiaques et applications mobiles collectent déjà d'énormes quantités de données, mais leur exploitation reste souvent limitée à des statistiques descriptives. L'IA permettra de transformer ces données en véritables **alertes préventives**. Un coureur amateur, par exemple, pourrait recevoir une notification l'avertissant que sa charge cumulée de la semaine augmente son risque de blessure de 30 %, en s'appuyant sur son historique personnel. De même, un joueur de football professionnel pourrait se voir signaler une fatigue neuromusculaire anormale après une série de sprints, incitant le staff à adapter la séance.

Parallèlement, les systèmes de **vidéo augmentée** devraient se généraliser. Grâce à des algorithmes d'estimation de pose exécutés en temps réel sur smartphone ou tablette, les entraîneurs pourront montrer immédiatement à leurs athlètes les erreurs techniques détectées, illustrées par des repères visuels (angles, trajectoires, zones de déséquilibre). Cette dimension pédagogique renforcera l'efficacité de la correction technique et favorisera l'appropriation des recommandations.

### 3.7.2. À moyen terme : personnalisation et simulation

À l'horizon d'une dizaine d'années, on peut anticiper une montée en puissance de la **personnalisation** grâce aux progrès du machine learning et à la disponibilité accrue de données longitudinales. Chaque athlète disposera d'un **profil dynamique**, intégrant son historique médical, ses caractéristiques morphologiques, ses réponses physiologiques et ses performances passées. Ce profil permettra à l'IA d'adapter en continu les charges et les exercices pour optimiser la progression tout en minimisant les risques.

Les **jumeaux numériques** joueront un rôle croissant. Déjà expérimentés dans certains sports comme le football américain, ils devraient s'étendre à d'autres disciplines. Ces doubles virtuels permettront de **simuler différents scénarios d'entraînement** : que se passe-t-il si l'on augmente de 15 % le volume d'un nageur ? Quel est l'impact d'un changement de chaussure chez un coureur ? Quelle est la probabilité de blessure si un joueur de basket enchaîne trois matchs en cinq jours ? Les réponses issues de la simulation permettront d'orienter les décisions sans exposer l'athlète à un risque réel.

La **réalité augmentée** et les environnements immersifs offriront également de nouvelles modalités de feedback. Un haltérophile pourra, par exemple, visualiser en direct un avatar 3D de son mouvement corrigé, ou voir s'afficher des repères virtuels pour ajuster sa posture. Ces outils faciliteront l'apprentissage technique et la prévention, en rendant visibles des paramètres biomécaniques jusque-là invisibles.

### 3.7.3. À long terme : vers une prévention systémique et prédictive

À plus long terme, l'objectif est de passer d'une prévention ponctuelle à une **prévention continue, systémique et prédictive**. L'IA sera alors capable de combiner des données issues

de multiples sources : capteurs biomécaniques miniaturisés intégrés aux vêtements ou aux chaussures, imagerie biomédicale portable, suivi hormonal non invasif, données contextuelles (qualité du sommeil, nutrition, stress). L'ensemble de ces informations, agrégées en temps réel, nourrit des modèles capables de détecter les moindres dérives de l'équilibre de charge et de proposer immédiatement des stratégies correctives.

Dans ce futur, la prévention pourrait devenir si fine que de nombreuses blessures seraient **quasi totalement évitables**. L'IA ne se contenterait plus d'alerter sur un risque, mais agirait comme un **système prédictif intégré**, ajustant en permanence l'entraînement, la récupération et même la préparation mentale. Dans une perspective clinique, elle pourrait anticiper les rechutes, individualiser les rééducations post-blessure et réduire considérablement la durée des arrêts.

Cette vision pose toutefois des questions de gouvernance. Qui contrôlera ces technologies ? Les clubs, les fédérations, les entreprises privées ? Comment éviter que les données biométriques des athlètes ne deviennent une ressource commerciale exploitée sans leur consentement ? La mise en place de **normes internationales** et de cadres éthiques robustes sera indispensable pour éviter les dérives et garantir que ces outils servent en priorité la santé et la performance des sportifs.

### 3.7.4. Une révolution comparable à la médecine prédictive

À terme, la prévention assistée par IA pourrait s'apparenter à une véritable **médecine prédictive appliquée au sport**. De la même manière que la médecine de précision utilise la génétique et l'imagerie pour anticiper les maladies, l'IA sportive utilisera les données biomécaniques et physiologiques pour prévenir les blessures. Cette convergence entre sport et santé ouvre un horizon inédit : prolonger significativement la carrière des athlètes professionnels, mais aussi sécuriser la pratique sportive de millions d'amateurs, en leur offrant un accompagnement personnalisé autrefois réservé à l'élite.

## 4. L'intelligence artificielle pour l'optimisation de la performance

### 4.1. Performance sportive : définitions et enjeux

La notion de performance sportive est au cœur de toutes les disciplines, mais elle reste **plurielle et contextuelle**. Dans certains sports, elle se définit par un indicateur objectif et mesurable, comme le temps en athlétisme ou en natation, la distance en saut ou en lancer, ou la charge maximale en haltérophilie. Dans d'autres, elle est évaluée par un **score**, qu'il s'agisse du nombre de buts en football, de paniers en basket ou de points en rugby. Dans des disciplines esthétiques ou artistiques comme la gymnastique, le patinage artistique ou la danse sportive, la

performance repose sur une combinaison de critères techniques et artistiques, évalués par un jury. Elle n'est donc pas toujours quantifiable de manière absolue et intègre une dimension subjective. Enfin, certains sports comme l'escrime ou le judo mêlent les deux approches, combinant l'efficacité du geste à une logique de stratégie et d'adaptation à l'adversaire.

#### 4.1.1. Une construction multifactorielle

Quelle que soit la discipline, la performance sportive est le résultat d'une **interaction complexe entre plusieurs dimensions** :

- **Physiologiques** : la force, la puissance, la vitesse, l'endurance, la souplesse, mais aussi la coordination intermusculaire et la récupération.
- **Psychologiques** : la motivation, la résilience, la gestion du stress, la confiance en soi et la concentration jouent un rôle déterminant, en particulier dans les compétitions à haute intensité.
- **Tactiques et stratégiques** : dans les sports collectifs, la performance dépend de la capacité à lire le jeu, à anticiper et à coopérer avec les coéquipiers.
- **Environnementales** : les conditions climatiques, la qualité du matériel (chaussures, vélos, combinaisons, ballons), mais aussi le soutien du public ou la pression médiatique peuvent influencer significativement le résultat.

Cette pluralité fait de la performance une réalité **multidimensionnelle et relative**, qui ne peut être réduite à un chiffre unique. Elle implique de prendre en compte le contexte, le niveau de compétition et les caractéristiques propres de l'athlète.

#### 4.1.2. De l'entraînement empirique aux outils de mesure

Historiquement, l'amélioration de la performance reposait principalement sur l'**expérience des entraîneurs** et l'observation empirique. Les plans d'entraînement étaient construits sur des principes de périodisation (alternance des phases de charge et de récupération), et les ajustements se faisaient au ressenti, à partir de la perception subjective de l'athlète ou de l'œil expert du coach. Si cette approche a produit de grands champions, elle présentait des limites évidentes : la subjectivité, l'incapacité à mesurer certaines dimensions invisibles (fatigue interne, micro-lésions musculaires) et l'absence de données continues.

Avec l'essor du numérique, les **outils de mesure objectifs** se sont progressivement imposés. Les GPS ont permis de quantifier la distance parcourue, les accéléromètres de mesurer l'intensité des sprints, les cardiofréquencemètres de suivre la fréquence cardiaque et les logiciels d'analyse vidéo d'examiner les gestes techniques image par image. Ces outils ont marqué une avancée majeure en fournissant des données précises et exploitables. Mais ils

restent essentiellement descriptifs : ils constatent ce qui s'est passé, sans prédire ce qui va se produire ni proposer des recommandations pour optimiser l'avenir.

### 4.1.3. L'entrée en scène de l'intelligence artificielle

C'est précisément sur ce point que l'intelligence artificielle marque une rupture. Là où les outils classiques se limitaient à fournir des indicateurs, l'IA permet de **passer d'une logique descriptive à une logique prédictive et prescriptive**. Non seulement elle peut identifier des tendances (par exemple une baisse progressive de la vitesse maximale), mais elle peut aussi anticiper une chute de performance avant qu'elle ne se manifeste, et suggérer des stratégies correctives adaptées à l'athlète. En combinant des données hétérogènes — physiologiques, psychologiques, tactiques et contextuelles —, l'IA devient un véritable **levier d'optimisation**, capable d'intégrer la complexité de la performance sportive.

### 4.1.4. Enjeux contemporains

Dans le sport de haut niveau, où la différence entre la victoire et la défaite se joue souvent sur des marges infimes (centièmes de seconde en sprint, millimètres en saut en longueur, précision d'un tir en escrime), l'optimisation de la performance constitue un **enjeu stratégique**. Les fédérations, les clubs professionnels et même les sponsors investissent massivement dans des technologies capables de fournir un avantage compétitif, aussi minime soit-il. La performance est désormais perçue non seulement comme un indicateur sportif, mais aussi comme un capital économique, médiatique et identitaire.

Chez les sportifs amateurs, la notion de performance prend une autre dimension : il s'agit souvent de progresser de manière durable, d'éviter les blessures et de maintenir la motivation à long terme. Dans ce contexte, l'IA offre également un potentiel de démocratisation, en mettant à disposition du grand public des outils d'analyse et de recommandation autrefois réservés aux laboratoires ou aux centres d'entraînement de l'élite.

## 4.2. Revue de littérature : modèles et approches

Les travaux scientifiques récents confirment que l'intelligence artificielle constitue aujourd'hui un levier majeur pour l'optimisation de la performance sportive. La littérature montre une diversité d'approches allant des modèles hybrides combinant plusieurs types de données, à la génération de données synthétiques, en passant par l'analyse biomécanique automatisée ou encore les jumeaux numériques.

### 4.2.1. Qin et al. (2025) : modèles hybrides de performance

Qin et al. ont proposé en 2025 un modèle prédictif particulièrement ambitieux intégrant simultanément des données **physiologiques**, **psychologiques** et **contextuelles**. Sur le plan physiologique, les variables incluaient le  $\text{VO}_2$  max, la fréquence cardiaque de repos, le seuil lactique et la récupération post-effort. Sur le plan psychologique, des questionnaires validés



mesuraient la résilience, la cohésion d'équipe et la confiance en soi. Enfin, le contexte incluait les conditions de match (météo, altitude, type d'adversaire).

Leur étude, menée sur des joueurs de sports collectifs (football et basket-ball), a montré qu'un modèle de machine learning combinant ces données atteignait **plus de 90 % de précision** dans la prédiction de la performance lors de matchs compétitifs. Ce résultat met en évidence deux éléments essentiels :

1. La performance sportive ne peut être réduite à une dimension biomécanique, elle est **multifactorielle**.
2. L'IA permet d'**intégrer des données hétérogènes**, difficiles à analyser de manière conjointe par un humain, pour fournir une vision holistique de l'athlète.

#### **4.2.2. Cordeiro et al. (2025) : données synthétiques pour pallier les limites**

Un défi récurrent dans les études est le **manque de données**, surtout dans les disciplines peu médiatisées. Les effectifs d'athlètes disponibles pour la recherche sont souvent réduits, ce qui limite la robustesse statistique des modèles. Pour répondre à ce problème, Cordeiro et al. (2025) ont proposé l'utilisation d'**autoencodeurs variationnels (VAE)** pour générer des données synthétiques réalistes.

Leur expérimentation, menée sur le football gaélique, a montré que l'ajout de données artificielles permettait d'améliorer la précision des modèles prédictifs de baisse de performance liée à la fatigue ou au surmenage. Cette approche illustre une évolution majeure : l'IA n'est plus seulement **consommatrice** de données, elle devient également **productrice** de nouvelles données, contribuant à pallier les limites de collecte du terrain. Cela ouvre la voie à des analyses plus solides même dans des disciplines moins riches en données.

#### **4.2.3. Dindorf (2024) : biomécanique et IA**

Dans l'ouvrage collectif dirigé par Dindorf, plusieurs contributions mettent en lumière le potentiel de la vision par ordinateur et du deep learning dans l'analyse technique. Par exemple, l'étude du service au tennis a montré que l'IA pouvait détecter des micro-variations dans la position du coude ou de l'épaule, imperceptibles à l'œil humain, mais associées à une perte de vitesse ou de précision. En course de fond, l'IA identifie les moments où la technique se dégrade (augmentation de l'oscillation verticale, raccourcissement de la foulée), permettant d'ajuster la stratégie de course ou de mieux gérer l'effort.

Ces travaux confirment que l'IA ne se limite pas à fournir un score global de performance, mais peut également devenir un **outil pédagogique** en apportant un feedback objectif, chiffré et exploitable aux entraîneurs et aux athlètes.

#### **4.2.4. Blondin (2025) : jumeaux numériques**

Blondin et ses collaborateurs insistent sur l'importance croissante des **jumeaux numériques** dans l'optimisation de la performance. Ces avatars virtuels reproduisent le fonctionnement biomécanique et physiologique d'un athlète à partir de ses données réelles. L'intérêt est de pouvoir simuler différents scénarios d'entraînement, de nutrition ou de récupération, et d'en estimer les conséquences avant de les appliquer dans la réalité.

Par exemple, un cycliste peut tester virtuellement l'impact d'une modification de sa cadence de pédalage ou de son alimentation pendant une course. Un footballeur peut simuler l'effet d'un enchaînement de matchs rapprochés sur ses capacités physiques et son risque de blessure. Bien que cette approche soit encore expérimentale, elle est déjà testée dans des disciplines comme le cyclisme, le football et la natation. Elle pourrait constituer, à terme, une révolution dans la manière dont les athlètes planifient et optimisent leur préparation.

#### **4.2.5. Vers une convergence des approches**

L'analyse de la littérature montre que ces approches ne sont pas exclusives mais **complémentaires**. Les modèles hybrides de Qin et al. démontrent la pertinence d'intégrer la dimension psychologique et contextuelle, souvent négligée. Les données synthétiques de Cordeiro et al. ouvrent une voie pour dépasser la rareté des échantillons. Les travaux de Dindorf soulignent l'apport de la vision par ordinateur dans l'analyse fine du geste technique. Enfin, les jumeaux numériques de Blondin esquissent une perspective de personnalisation extrême et de simulation prospective.

À travers cette diversité, un point commun se dégage : l'IA tend à transformer l'optimisation de la performance en une **science intégrative**, combinant biomécanique, physiologie, psychologie et stratégie, pour répondre aux enjeux complexes du sport moderne.

### **4.3. Applications concrètes**

L'apport de l'intelligence artificielle à l'optimisation de la performance sportive ne se limite pas à la recherche académique. De plus en plus d'applications pratiques voient le jour dans les clubs professionnels comme dans le sport amateur. Ces applications concernent principalement la personnalisation de l'entraînement, l'analyse biomécanique, le suivi de la charge de travail et la préparation mentale et cognitive.

#### **4.3.1. Coaching personnalisé**

Le coaching sportif a longtemps reposé sur des plans d'entraînement génériques, fondés sur des principes universels de périodisation ou sur l'expérience accumulée par les entraîneurs. Si cette approche a prouvé son efficacité, elle présente l'inconvénient de ne pas tenir compte des différences interindividuelles : morphologie, tolérance à la charge, historique de blessures, disponibilité psychologique.

L'IA permet de franchir une étape décisive vers un **entraînement personnalisé**. En intégrant des données issues de capteurs (fréquence cardiaque, variabilité cardiaque, vitesse de course, puissance développée), mais aussi des questionnaires subjectifs (fatigue perçue, motivation), les algorithmes adaptent en temps réel le contenu des séances.

Dans le domaine de la **musculature**, certaines applications ajustent automatiquement les charges et le volume de répétitions en fonction des performances récentes. Des plateformes comme **Whoop**, **Strava** ou **MyCoach** commencent déjà à proposer des programmes individualisés, basés sur l'analyse de la récupération et de la charge cumulée. Dans les sports d'endurance, les modèles prédictifs utilisent les fluctuations de la variabilité cardiaque pour recommander une intensité adaptée, évitant ainsi les surcharges chroniques.

L'un des bénéfices majeurs de cette approche est l'**ajustement dynamique**. Là où les plans traditionnels imposent une progression fixe, l'IA autorise une adaptation quotidienne, prenant en compte l'état réel de l'athlète. Ainsi, deux sportifs suivant le même programme peuvent évoluer de manière différente en fonction de leurs réactions, garantissant un suivi beaucoup plus individualisé.

#### 4.3.2. Analyse biomécanique

L'analyse technique constitue un autre champ d'application majeur. Les erreurs de geste, souvent invisibles pour l'œil humain, peuvent avoir un impact considérable sur la performance comme sur le risque de blessure. Grâce à la vision par ordinateur et à l'estimation de pose, l'IA offre aujourd'hui une **analyse fine et objective du mouvement sportif**.

En **athlétisme**, les systèmes de suivi vidéo permettent d'identifier des asymétries dans la foulée, une augmentation de l'oscillation verticale ou un raccourcissement progressif de la foulée en fin de course, autant de signes annonciateurs d'une fatigue technique. En **tennis**, l'IA analyse le service ou le revers en mesurant l'angle du bras, la vitesse de rotation du tronc et la position des appuis, permettant de corriger des défauts subtils qui limiteraient l'efficacité ou augmenteraient le risque de blessure à l'épaule.

Dans les **sports de force**, comme l'haltérophilie ou la musculature, l'IA détecte les erreurs de trajectoire de la barre, l'inclinaison excessive du tronc ou l'instabilité des genoux lors d'un squat. Ces feedbacks, auparavant réservés aux laboratoires équipés de systèmes de motion capture, sont désormais accessibles avec une simple caméra de smartphone.

Enfin, dans les sports artistiques comme la **gymnastique** ou le **patinage artistique**, l'IA est capable d'analyser l'exécution des figures, en évaluant la précision des angles articulaires, la symétrie des mouvements ou la régularité des rotations. Ces informations, couplées aux jugements des arbitres, pourraient contribuer à renforcer l'objectivité et la transparence des notations.

#### 4.3.3. Suivi de la charge de travail

La gestion de la charge d'entraînement constitue l'un des piliers de la performance. Une charge trop faible empêche la progression, tandis qu'une charge excessive augmente le risque de blessure et de surmenage. L'IA offre ici un avantage décisif en intégrant simultanément des données objectives et subjectives.

Les clubs professionnels de football ou de rugby utilisent déjà des systèmes comme **Catapult** ou **STATSports**, qui combinent GPS, accéléromètres et cardiofréquencemètres pour suivre en temps réel la charge externe (distances, vitesses, sprints) et la charge interne (fréquence cardiaque, perception de l'effort). Les algorithmes analysent ces données pour calculer des indicateurs de fatigue et signaler les situations de risque.

En **basket-ball NBA**, des modèles prédictifs estiment la probabilité qu'un joueur subisse une blessure musculaire en fonction du nombre de minutes jouées, de la fréquence des déplacements explosifs et de son historique médical. Cela permet d'anticiper les besoins de repos et de gérer les rotations d'effectif. Dans le **cyclisme de haut niveau**, l'IA intègre la puissance développée, la fréquence cardiaque et les données environnementales (pente, température) pour optimiser l'équilibre entre entraînement et récupération.

Ces outils dépassent la simple collecte de données pour entrer dans une logique **prédictive** : ils ne se contentent pas de dire ce qui s'est passé, mais indiquent ce qui risque de se produire si l'on poursuit la même charge, et recommandent des ajustements ciblés.

#### 4.3.4. Préparation mentale et cognitive

La performance sportive ne repose pas uniquement sur le physique ; la dimension mentale est déterminante, en particulier dans les compétitions de haut niveau où la pression psychologique est intense. L'IA commence à être mobilisée pour analyser et renforcer cette dimension.

Certaines recherches utilisent l'IA pour analyser le **langage corporel**, les expressions faciales ou la voix des athlètes afin de détecter des signes de stress, de fatigue psychologique ou de démotivation. Ces indicateurs, couplés à des questionnaires auto-déclarés, permettent de dresser un profil mental dynamique de l'athlète et d'adapter la préparation en conséquence.

Par ailleurs, des projets combinent IA et **réalité virtuelle** pour simuler des situations de compétition à haute pression. Par exemple, un tireur à l'arc peut s'entraîner face à une simulation réaliste de public bruyant et de conditions météorologiques variables, tout en recevant un feedback automatisé sur sa régularité et sa concentration. Dans le football, des environnements immersifs reproduisent la pression d'un penalty décisif, permettant au joueur de travailler sa résilience et sa gestion émotionnelle.

Enfin, l'IA peut contribuer à la **préparation cognitive**, en analysant les temps de réaction, la capacité de prise de décision rapide ou l'attention sélective. Des systèmes de neurofeedback, couplés à des algorithmes de machine learning, entraînent les athlètes à maintenir leur concentration dans des situations de surcharge cognitive. Ces approches, encore

expérimentales, pourraient devenir centrales dans le sport de haut niveau, où la différence entre la victoire et la défaite se joue parfois dans la capacité à gérer un instant critique.

## 4.4. Discussion : apports et limites

L'analyse des travaux scientifiques et des applications concrètes montre que l'intelligence artificielle constitue un levier considérable pour l'optimisation de la performance sportive. Ses apports sont multiples et largement documentés, mais elle soulève aussi des limites techniques, éthiques et sociales qu'il convient de discuter.

### 4.4.1. Les apports : vers une nouvelle ère de l'entraînement

L'un des apports majeurs de l'IA réside dans son **objectivité**. Alors que l'observation humaine est soumise à la subjectivité, aux biais de perception et à la fatigue, les modèles algorithmiques produisent des données chiffrées et reproductibles. Cette objectivité renforce la confiance dans les analyses et permet de comparer les performances dans le temps ou entre athlètes.

Un second apport est la **personnalisation**. Grâce à l'intégration de données physiologiques, biomécaniques et psychologiques, chaque athlète bénéficie d'un suivi adapté à son profil unique. Cette personnalisation répond à une demande croissante, car les limites des approches génériques sont de plus en plus reconnues.

La **prédictivité** constitue un autre avantage essentiel. L'IA permet de passer d'une logique réactive (« analyser après coup ») à une logique proactive (« anticiper avant que la baisse de performance ou la blessure ne survienne »). Cette capacité change radicalement la gestion de l'entraînement et de la compétition.

Enfin, la **multifactorialité** : là où les entraîneurs peinent à intégrer simultanément des dizaines de variables hétérogènes, les algorithmes parviennent à dégager des patterns pertinents, combinant données physiologiques, tactiques, environnementales et psychologiques. L'IA devient ainsi un véritable **outil d'intégration systémique**, qui reflète mieux la complexité de la performance sportive.

### 4.4.2. Les limites techniques et scientifiques

Malgré ces atouts, plusieurs limites persistent. La première est la **complexité des modèles**. Les entraîneurs et préparateurs physiques n'ont pas toujours les compétences pour interpréter les résultats, surtout lorsque les algorithmes reposent sur des réseaux neuronaux profonds opaques. Cela peut créer un décalage entre la puissance de l'outil et sa réelle utilisabilité sur le terrain.

Une autre limite est liée aux **biais de données**. Un modèle entraîné sur des athlètes d'élite, majoritairement masculins, ne sera pas forcément pertinent pour des femmes, des jeunes ou

des amateurs. Les risques de mauvaise généralisation sont importants, et les résultats peuvent être trompeurs s'ils ne sont pas contextualisés.

La **robustesse** est également un défi. Les algorithmes entraînés en laboratoire peuvent perdre en précision dans des conditions réelles : mauvaise luminosité, bruit des capteurs, mouvements atypiques. Le transfert des modèles vers des environnements variés reste un obstacle majeur.

#### 4.4.3. Les enjeux sociaux et éthiques

Sur le plan social, certains sportifs craignent une **déshumanisation** de la relation entraîneur-athlète. L'IA, si elle est utilisée sans discernement, pourrait réduire l'entraîneur à un simple exécutant des recommandations algorithmiques, ce qui fragiliserait son rôle d'accompagnateur humain. L'équilibre entre expertise humaine et assistance technologique doit être soigneusement préservé.

Le **coût** des infrastructures représente un autre facteur limitant. Si les clubs professionnels de football, de rugby ou de NBA investissent massivement dans ces outils, les clubs amateurs ou les disciplines moins médiatisées peinent à accéder à ces technologies. Le risque est de creuser un fossé entre élite et base, accentuant les inégalités déjà existantes dans le sport.

Enfin, les **enjeux éthiques** liés à la protection des données ne peuvent être ignorés. Les informations biométriques collectées — fréquence cardiaque, variabilité cardiaque, vidéos des gestes, historiques médicaux — sont extrêmement sensibles. Leur utilisation à des fins commerciales ou contractuelles pourrait compromettre les droits fondamentaux des athlètes. La question de la propriété des données reste ouverte : appartiennent-elles à l'athlète, au club, à la fédération ou à l'entreprise technologique qui fournit le service ?

#### 4.4.4. Perspectives et équilibre à trouver

Malgré ces limites, les perspectives offertes par l'IA dans l'optimisation de la performance restent immenses. À court terme, son intégration dans des applications mobiles et des capteurs portables devrait se généraliser, démocratisant en partie l'accès à l'analyse personnalisée. À moyen terme, les **jumeaux numériques** pourraient devenir un standard dans le suivi des athlètes de haut niveau, offrant des simulations toujours plus précises. À long terme, on peut envisager des systèmes globaux capables d'analyser simultanément la dimension physique, psychologique et tactique, et de fournir une aide à la décision intégrée, en temps réel, aux entraîneurs et aux sportifs.

Le véritable défi résidera dans la **cohabitation entre expertise humaine et assistance algorithmique**. L'IA ne doit pas se substituer à l'entraîneur, mais enrichir son regard, l'aider à prendre des décisions mieux informées et à personnaliser l'accompagnement. Elle doit être conçue comme un outil de **co-pilotage** de la performance, garantissant que l'athlète reste au centre du processus décisionnel.

# 5. L'intelligence artificielle pour l'assistance à l'arbitrage

## 5.1. L'arbitrage sportif : un rôle central mais controversé

L'arbitrage est l'une des pierres angulaires du sport moderne. Depuis la professionnalisation des compétitions, l'arbitre occupe une fonction essentielle : garantir le respect des règles, assurer l'équité entre adversaires et préserver l'intégrité du jeu. Sa mission dépasse la simple application mécanique des règlements : il incarne une **autorité symbolique**, une figure de neutralité censée maintenir la confiance des athlètes, des entraîneurs et du public dans la légitimité du résultat.

Pourtant, malgré son rôle central, l'arbitrage demeure une source récurrente de polémiques. Chaque décision contestée peut avoir des conséquences considérables, tant sur le plan sportif qu'économique. Dans certains sports, l'arbitre est considéré comme un **acteur invisible** quand ses décisions passent inaperçues, mais il devient immédiatement la cible de critiques dès qu'un doute ou une erreur surgit. Cette ambivalence structure le rapport entre arbitres, athlètes et spectateurs.

### 5.1.1. La pression et la complexité du rôle

L'arbitre évolue dans un environnement d'une extrême exigence. La vitesse des actions, la multiplicité des paramètres à prendre en compte et l'interprétation des règles rendent la tâche particulièrement complexe.

- Dans le **football**, un hors-jeu peut se jouer à quelques centimètres, parfois invisibles à l'œil nu.
- Dans le **basket-ball**, l'arbitre doit décider en une fraction de seconde s'il y a faute ou simple contact autorisé, sous la pression de joueurs et de milliers de spectateurs.
- En **escrime**, discipline où une action dure parfois moins d'une seconde, l'arbitre doit interpréter simultanément la vitesse, l'intention et la priorité des gestes.
- En **gymnastique** ou en **patinage artistique**, la subjectivité est encore plus marquée : l'arbitre doit évaluer l'esthétique, l'exécution et parfois même l'expression artistique.

À cette complexité s'ajoute la pression médiatique et économique. Dans les sports les plus médiatisés, une erreur arbitrale peut coûter des millions : une élimination en Ligue des champions, une médaille olympique manquée, ou un titre de NBA perdu sur une faute non sifflée. L'arbitrage devient ainsi un enjeu dépassant le cadre strictement sportif.

### 5.1.2. Polémiques célèbres et impact médiatique

L'histoire du sport regorge d'exemples où l'arbitrage a suscité de vives polémiques :

- La « **main de Dieu** » de Diego Maradona lors de la Coupe du monde 1986, validée malgré la faute manifeste, reste l'un des cas les plus célèbres.
- Le **but fantôme** de Frank Lampard contre l'Allemagne en 2010, non validé alors que le ballon avait franchi la ligne, a accéléré l'introduction de la goal-line technology en football.
- Aux **Jeux olympiques de Londres 2012**, la fleurettiste coréenne Shin A-Lam est restée en pleurs sur la piste après une décision arbitrale controversée, relançant le débat sur l'équité en escrime.
- En **tennis**, l'absence du système Hawk-Eye lors de certains matchs a généré des contestations, poussant à sa généralisation pour garantir l'objectivité.
- En **NBA**, des fautes non sifflées dans les dernières secondes de matchs décisifs ont régulièrement alimenté les soupçons de favoritisme ou d'incompétence.

Ces polémiques illustrent un paradoxe : l'arbitrage est censé pacifier et réguler le jeu, mais il devient souvent le foyer des tensions, mettant en péril la crédibilité de la compétition.

### 5.1.3. De l'autorité humaine à l'assistance technologique

Face à ces controverses, les sports ont progressivement intégré des outils technologiques pour soutenir l'arbitrage.

- Le **Hawk-Eye** en tennis a permis de valider objectivement si une balle était « in » ou « out ».
- La **goal-line technology** en football, introduite à partir de 2012, a mis fin aux polémiques sur les buts fantômes.
- La **VAR (Video Assistant Referee)** a ensuite marqué une nouvelle étape, permettant aux arbitres de revoir des actions litigieuses via des caméras multiples.
- Le **rugby** ou le **cricket** ont intégré des systèmes vidéo bien avant le football, habituant progressivement les spectateurs à un arbitrage assisté par la technologie.



Ces innovations, bien que significatives, reposaient encore sur une logique de **révision humaine assistée** : la technologie fournit une image ou une donnée supplémentaire, mais la décision finale restait humaine.

#### 5.1.4. L'arrivée de l'intelligence artificielle : un tournant

C'est dans ce contexte que l'intelligence artificielle s'est imposée comme une nouvelle étape. Contrairement aux technologies précédentes, qui se contentaient de montrer une image ou de signaler une donnée binaire (balle dedans/dehors, ballon franchissant ou non la ligne), l'IA est capable d'**analyser, d'interpréter et de proposer une décision**.

Elle promet une cohérence et une rapidité inédites, mais soulève aussi une question fondamentale : **jusqu'où déléguer la responsabilité de la décision à la machine ?**

Ainsi, l'arbitrage sportif se trouve aujourd'hui à un carrefour historique. D'un côté, il reste une fonction profondément humaine, fondée sur l'autorité, l'interprétation et la symbolique de la justice. De l'autre, il s'ouvre à des outils d'intelligence artificielle capables de réduire l'erreur et d'assurer une cohérence mondiale. Ce basculement, porteur d'opportunités mais aussi de tensions, constitue le cœur des débats actuels sur l'avenir de l'arbitrage.

## 5.2. Revue de littérature

L'essor de l'intelligence artificielle dans l'arbitrage sportif a donné lieu à une littérature de plus en plus dense, mêlant analyses scientifiques, rapports institutionnels et débats médiatiques. Ces travaux révèlent une tension constante entre **innovation technologique** et **acceptabilité sociale**, entre la quête d'objectivité et le maintien de la légitimité humaine.

### 5.2.1. Protschky et al. (2025) : perceptions des arbitres

L'étude menée par Protschky et collègues (2025) auprès d'arbitres de Bundesliga et d'officiels de l'UEFA illustre bien cette tension. Les résultats montrent que les arbitres perçoivent l'IA comme un **outil d'appui**, capable de renforcer la cohérence et la rapidité des décisions. Toutefois, ils expriment aussi de fortes inquiétudes :

- La crainte d'une **perte d'autorité symbolique**, si leur rôle se réduit à valider une décision générée par la machine.
- Le risque d'une **dépendance excessive**, qui éroderait leurs compétences d'interprétation.
- La transformation du rôle de l'arbitre en simple « **gestionnaire de technologie** », plutôt qu'en garant de la justice sportive.

Cette étude souligne que l'arbitrage ne se limite pas à une opération technique : il repose aussi sur une dimension **relationnelle et symbolique** entre arbitres, joueurs et public.

### 5.2.2. FIFA 2022 : le hors-jeu semi-automatisé

L'exemple le plus médiatisé reste sans doute l'introduction par la FIFA, lors de la Coupe du monde 2022, du **hors-jeu semi-automatisé**. Le système combine 12 caméras de suivi optique installées dans le stade et un capteur placé dans le ballon, permettant de calculer la position de chaque joueur 50 fois par seconde. Lorsqu'une situation potentielle de hors-jeu est détectée, une alerte est envoyée à l'assistance vidéo, qui transmet ensuite à l'arbitre central.

Les bénéfices sont indéniables :

- Réduction du temps d'attente pour valider un hors-jeu.
- Plus grande cohérence dans l'application de la règle.
- Limitation des polémiques liées aux erreurs grossières.

Mais ce système illustre aussi une **hybridation délicate** : la machine détecte et calcule, mais c'est encore l'humain qui tranche. Cette logique intermédiaire reflète la difficulté à déléguer totalement une décision sportive à une IA.

### 5.2.3. Fujitsu Gymnastics : l'IA comme juge

À l'opposé du football, la gymnastique a expérimenté une approche plus radicale. La Fédération internationale (FIG) s'est associée à **Fujitsu** pour développer un système d'analyse automatisée des mouvements. Des capteurs et algorithmes détectent les positions du corps en trois dimensions et attribuent une note objective, en fonction de la conformité à la figure attendue.

Ce dispositif va au-delà de l'assistance : il **participe activement à l'évaluation**.

- **Avantage** : réduire la subjectivité inhérente aux jugements humains, souvent critiqués pour favoritisme ou incohérence.
- **Limite** : risque de déshumanisation du jugement artistique, où l'interprétation et la sensibilité jouent historiquement un rôle.

La gymnastique illustre donc une **substitution partielle** de l'arbitre par la machine.

### 5.2.4. Autres cas emblématiques dans la littérature

### **Hawk-Eye en tennis et cricket**

Le système Hawk-Eye, introduit au début des années 2000, constitue l'un des premiers exemples d'arbitrage technologique. Basé sur une triangulation de caméras, il permet de déterminer avec précision si une balle est « in » ou « out ».

- En tennis, il a radicalement réduit les contestations, devenant un outil accepté par joueurs et spectateurs.
- En cricket, il est utilisé pour arbitrer les « LBW » (Leg Before Wicket), une règle particulièrement sujette à interprétation.

Hawk-Eye est souvent cité comme une réussite : il montre que la technologie peut s'intégrer harmonieusement lorsqu'elle est simple, transparente et rapide.

### **VAR en football**

Introduite progressivement à partir de 2017, la **Video Assistant Referee (VAR)** a bouleversé l'arbitrage du football. Si elle a permis de corriger des erreurs manifestes (buts refusés à tort, pénaltys oubliés), elle a aussi suscité de vives critiques :

- Allongement des temps d'attente.
- Manque de clarté pour les spectateurs.
- Décisions parfois perçues comme incohérentes malgré la technologie.

La littérature montre que la VAR illustre le dilemme de l'arbitrage technologique : elle améliore la justice théorique, mais fragilise parfois l'expérience émotionnelle du sport.

### **Rugby et arbitrage vidéo**

Le rugby, précurseur, utilise depuis longtemps l'arbitrage vidéo (TMO : Television Match Official). L'arbitre central peut consulter les images pour valider un essai ou sanctionner une faute. La culture rugbystique, plus ouverte à la collaboration avec la vidéo, a facilité son adoption, contrairement au football où la résistance a été plus forte.

### **Patinage artistique et controverses**

Enfin, des disciplines esthétiques comme le patinage artistique ou le plongeon sont confrontées à la subjectivité du jugement. Les scandales de favoritisme ou de corruption (notamment aux JO de Salt Lake City 2002 en patinage artistique) ont alimenté la réflexion sur une possible automatiser. Si l'IA pouvait attribuer des notes objectives basées sur la biomécanique des sauts, elle réduirait les biais, mais au risque de nier la part artistique de ces sports.

## **5.2.5. Synthèse de l'état de l'art**

La littérature met en évidence deux grands modèles :

1. **L'assistance à l'humain** : l'IA fournit des informations, mais l'arbitre conserve la décision finale (football, rugby, escrime potentiellement).
2. **La substitution partielle** : l'IA participe activement à la décision, voire la prend en partie (gymnastique, patinage artistique à terme).

Le choix entre ces modèles dépend de trois facteurs :

- **La faisabilité technique** (rapidité des gestes, clarté des règles).
- **L'acceptabilité sociale** (public et athlètes prêts à accepter la décision de la machine).
- **La culture sportive** (importance symbolique de l'arbitre dans chaque discipline).

Ainsi, l'arbitrage par IA ne progresse pas de manière uniforme : il avance plus vite dans les sports mesurables (tennis, football), plus lentement dans les disciplines esthétiques (gymnastique, patinage), où la subjectivité fait partie intégrante de l'expérience.

## 5.3. Étude de cas : l'escrime et l'entretien avec le Maître David Bucquet

L'escrime constitue un terrain d'étude particulièrement intéressant pour réfléchir à l'usage de l'intelligence artificielle dans l'arbitrage. Discipline olympique historique, sport de combat où chaque échange se joue en une fraction de seconde, elle exige une interprétation instantanée et souvent controversée des gestes. Contrairement à d'autres sports, l'escrime ne se limite pas à constater un fait objectif (comme un ballon franchissant une ligne) : elle repose sur la **notion de priorité**, une règle complexe qui demande à l'arbitre de juger l'intention et la construction de l'action.

Pour approfondir cette question, un entretien a été mené avec **David Bucquet**, maître d'armes et conseiller technique régional de la ligue Centre-Val de Loire, spécialisé dans le fleuret. Ses propos, replacés dans le contexte plus large des débats autour de l'arbitrage en escrime, mettent en lumière plusieurs dimensions clés de la possible intégration de l'IA.

### 5.3.1. L'interprétation comme fondement de l'arbitrage

Selon le Maître Bucquet, ce qui distingue l'attribution d'un point à un tireur plutôt qu'à son adversaire repose avant tout sur **l'interprétation de l'intention**. L'arbitre doit déterminer qui avait la priorité : celui qui a pris l'initiative de l'attaque ou celui qui a défendu efficacement. Or, cette interprétation varie d'un arbitre à l'autre.

Un exemple célèbre illustre cette difficulté : lors des **Jeux olympiques de Londres 2012**, la fleurettiste sud-coréenne **Shin A-Lam** a perdu une demi-finale dans des circonstances controversées. L'arbitre avait accordé le point décisif à son adversaire allemande, provoquant une longue contestation et des images marquantes de Shin assise en larmes sur la piste. Cet épisode a cristallisé les critiques : l'arbitrage en escrime souffre d'une **variabilité et d'une subjectivité** qui peuvent changer l'issue d'une compétition.

C'est précisément ici que l'IA pourrait jouer un rôle : en apportant une cohérence que l'humain, par nature, ne peut garantir. Un système automatisé pourrait, en théorie, appliquer les mêmes critères à chaque situation, réduisant ainsi les divergences d'interprétation entre arbitres.

### 5.3.2. Une IA adaptée à l'évolution de l'arbitrage

L'un des points soulevés par le Maître Bucquet est que l'arbitrage en escrime n'est pas figé : il a évolué au fil du temps, parfois en s'éloignant du texte des règles pour tendre vers une interprétation dite « contemporaine ». Ainsi, la notion de priorité au fleuret ne se juge pas de la même manière en Europe, en Asie ou en Amérique, et les fédérations internationales tolèrent ces différences culturelles.

Programmer une IA pour qu'elle reflète cette pratique contemporaine plutôt qu'une lecture littérale des textes représente un défi.

- Une **IA trop rigide**, appliquant le règlement au mot près, créerait une rupture avec les habitudes actuelles des arbitres et des athlètes.
- Une **IA adaptative**, capable de suivre les mouvances arbitrales au fil des compétitions, exigerait un entraînement complexe et une mise à jour continue des modèles.

Cette problématique n'est pas propre à l'escrime. En **judo**, par exemple, les règles sur les saisies et les projections ont évolué régulièrement, modifiant la manière dont les arbitres jugent une action. De même, en **gymnastique**, les codes de notation sont révisés tous les quatre ans. L'IA doit donc intégrer une **dimension évolutive**, ce qui suppose une gouvernance sportive forte et une mise à jour régulière des bases de données d'entraînement.

### 5.3.3. Neutralité et impartialité

Interrogé sur la question de la neutralité, le Maître Bucquet insiste sur un enjeu majeur : l'arbitrage humain peut parfois être influencé par des biais, y compris politiques ou nationaux. Dans certaines compétitions internationales, les suspicions de favoritisme persistent, certains arbitres étant accusés de favoriser les tireurs de leur propre pays ou de nations influentes.

L'IA pourrait apporter une réponse à ce problème en se concentrant uniquement sur les gestes et les données de mouvement, sans tenir compte de l'identité ou de la réputation des tireurs.

Cette **neutralité algorithmique** renforcerait la confiance dans l'équité des compétitions internationales.

Cependant, il faut nuancer : l'IA elle-même peut intégrer des biais, non pas politiques, mais **liés à la constitution des datasets**. Si les modèles sont entraînés majoritairement sur des compétitions européennes, les styles de combat asiatiques ou africains risquent d'être mal interprétés. L'impartialité ne réside donc pas seulement dans l'absence d'intention humaine, mais aussi dans la représentativité des données utilisées.

#### 5.3.4. Complément ou remplacement ?

Sur la question du rôle final de l'IA, le Maître Bucquet reste clair : l'IA doit demeurer un **complément** à l'arbitre humain, et non un substitut total. Comme avec l'assistance vidéo au football, l'arbitre garderait le dernier mot.

- L'IA interviendrait pour confirmer une décision ou proposer une autre perspective.
- Elle pourrait signaler une incohérence ou un angle de vue négligé.
- Mais elle ne devrait pas être la seule à trancher, sous peine de délégitimer la fonction arbitrale.

Cette position rejoint celle exprimée par Protschky et al. (2025) : l'arbitre ne doit pas être réduit à un « validateur de machine ». La légitimité humaine reste essentielle, car le sport n'est pas seulement une question de faits mesurables, mais aussi de symbolique et de confiance.

#### 5.3.5. Acceptabilité par les athlètes

Enfin, concernant l'acceptabilité par les tireurs, le Maître Bucquet reste sceptique. Même si l'IA apporte plus de neutralité, il y aura toujours une part de contestation et de mauvaise foi. Dans l'histoire de l'escrime, comme dans d'autres sports, les athlètes contestent rarement parce qu'ils croient réellement avoir raison, mais parce que la contestation fait partie de la dramaturgie du jeu.

En **football**, malgré la VAR, les joueurs continuent de protester auprès de l'arbitre. En **tennis**, certains joueurs contestent encore une balle même après validation par Hawk-Eye, bien que la technologie soit d'une précision reconnue. L'acceptabilité dépend donc moins de l'objectivité technique que de la **culture du sport** et du rapport au jugement.

Selon le Maître Bucquet, l'IA améliorera la cohérence, mais pas nécessairement l'acceptation émotionnelle des décisions. Tant que les mentalités n'évoluent pas, l'arbitre — qu'il soit humain ou assisté par IA — restera une figure contestée.

## 5.4. Discussion et acceptabilité sociale

L'intégration de l'intelligence artificielle dans l'arbitrage ne dépend pas uniquement de ses performances techniques. Même si un modèle atteint une précision quasi parfaite, son efficacité réelle repose sur son **acceptabilité sociale**. L'histoire récente du sport montre que les acteurs — athlètes, entraîneurs, arbitres, spectateurs — n'acceptent pas automatiquement une décision simplement parce qu'elle est plus objective : la **légitimité** et la **compréhension** jouent un rôle tout aussi crucial.

### 5.4.1. L'IA comme outil de cohérence

Le premier apport incontestable de l'IA est la capacité à renforcer la **cohérence inter-arbitres**. Là où deux arbitres humains peuvent diverger dans leur interprétation, l'IA applique des critères stables et reproductibles. Cette homogénéité est particulièrement précieuse dans les compétitions internationales.

En escrime, par exemple, les divergences entre arbitres européens et asiatiques sur la priorité au fleuret nourrissent régulièrement des tensions. Une IA bien entraînée pourrait réduire ces différences et garantir une cohérence mondiale. Cette capacité de normalisation constitue l'un des principaux arguments en faveur de l'IA : elle permet d'assurer que les mêmes règles s'appliquent partout, de manière uniforme.

### 5.4.2. Autorité et légitimité

Un enjeu central demeure toutefois la question de l'**autorité**. L'arbitre n'est pas seulement un technicien chargé d'appliquer des règles : il incarne une figure de légitimité symbolique. Son geste, son coup de sifflet, son regard, font partie intégrante de la dramaturgie sportive.

Si l'IA prenait seule les décisions, ce rôle serait remis en cause. L'arbitre risquerait d'apparaître comme un simple opérateur technique, validant des calculs algorithmiques sans marge de jugement. Comme le souligne Bucquet, « l'arbitre doit rester l'ultime décideur » : non seulement pour préserver sa fonction, mais aussi pour maintenir la confiance du public.

L'exemple du tennis est révélateur. Dans certains tournois récents, le système Hawk-Eye a totalement remplacé les juges de ligne. Si les décisions sont incontestables, certains joueurs et spectateurs regrettent la disparition de la dimension humaine, du rituel et des interactions entre arbitres et joueurs. L'efficacité technique ne suffit donc pas à assurer la légitimité culturelle.

### 5.4.3. Neutralité et lutte contre les biais

L'un des arguments les plus puissants en faveur de l'IA est son impartialité. Contrairement à l'humain, elle ne distingue pas l'identité, la nationalité ou le statut d'un athlète. Dans les compétitions internationales, souvent marquées par des soupçons de favoritisme, cet atout est considérable.

Cependant, cette neutralité est relative : une IA peut intégrer des biais cachés si les données d'entraînement sont déséquilibrées. Un modèle entraîné majoritairement sur des compétitions européennes pourrait mal interpréter des styles de jeu asiatiques ou africains. L'IA peut donc limiter les biais humains, mais non les supprimer entièrement.

Le débat devient alors éthique : qu'est-ce qui est préférable ? Un biais humain assumé et corrigible par la critique publique, ou un biais algorithmique invisible, difficile à identifier et à contester ?

#### 5.4.4. Acceptabilité par les publics

L'expérience de la VAR en football illustre parfaitement ce dilemme. Conçue pour réduire les erreurs manifestes, elle a certes corrigé de nombreuses injustices, mais elle a aussi généré de nouvelles frustrations :

- **Temps d'attente** qui cassent le rythme émotionnel du match.
- **Décisions millimétrées** jugées trop froides (hors-jeu d'une chaussure).
- **Manque de transparence** : les spectateurs dans le stade ne voient pas toujours les images utilisées.

À l'inverse, Hawk-Eye en tennis a été largement accepté, car il est rapide, visuel et facilement compréhensible. Chaque spectateur voit la trajectoire de la balle, et la décision devient indiscutable. La pédagogie et la transparence sont donc des conditions essentielles d'acceptabilité.

En escrime, où la plupart des spectateurs ne maîtrisent pas les subtilités des règles de priorité, une IA pourrait être perçue soit comme un gage de clarté, soit comme une **boîte noire incompréhensible**. Tout dépendra de la manière dont ses décisions seront présentées : simples chiffres opaques ou explications visuelles pédagogiques.

#### 5.4.5. Entraîneurs, athlètes et sponsors

L'acceptabilité ne concerne pas seulement le public.

- Les **athlètes**, même lorsqu'ils savent qu'une décision est juste, peuvent continuer à contester par stratégie ou réflexe émotionnel. L'IA ne supprimera donc pas totalement les polémiques.
- Les **entraîneurs** peuvent craindre de perdre leur influence dans le dialogue avec l'arbitre. Si la décision devient entièrement algorithmique, leur rôle de contestation et de négociation s'efface.



- Les **sponsors et diffuseurs** ont, eux, un intérêt direct : des décisions plus justes renforcent la crédibilité des compétitions et la confiance du public, ce qui préserve la valeur économique des droits télévisés.

L'arbitrage assisté par IA n'est donc pas seulement une question technique, mais aussi un **enjeu économique et politique**.

#### 5.4.6. Risque de dépendance technologique

Enfin, un dernier risque concerne la **dépendance excessive**. Si les arbitres deviennent de simples exécutants des décisions de la machine, leurs compétences pourraient s'éroder. À long terme, cela fragiliserait la pratique même de l'arbitrage : que se passerait-il en cas de panne du système ?

Ce scénario n'est pas purement théorique. En 2022, un match de football en deuxième division italienne a été marqué par une panne temporaire de la VAR, obligeant les arbitres à reprendre le contrôle total du match. L'absence d'habitude à juger sans assistance a provoqué plusieurs erreurs, largement commentées dans la presse.

La dépendance à la technologie doit donc être maîtrisée : l'IA doit soutenir l'humain, mais l'humain doit rester capable d'assumer la décision en toutes circonstances.

### 5.5. Perspectives

L'avenir de l'intelligence artificielle dans l'arbitrage reste ouvert et dépendra à la fois des avancées techniques, de l'acceptabilité sociale et des choix institutionnels des fédérations. Plusieurs trajectoires peuvent être envisagées, allant d'une simple assistance accrue à une transformation radicale de la fonction arbitrale.

#### 5.5.1. L'assistance renforcée : continuité et consolidation

Le premier scénario est celui d'une **assistance renforcée**, où l'IA ne fait qu'appuyer l'arbitre dans ses décisions. C'est déjà le cas avec la VAR en football ou avec Hawk-Eye au tennis.

Dans ce modèle, la machine :

- détecte les situations litigieuses,
- fournit une visualisation claire (trajectoire, position, temps de réaction),
- laisse l'arbitre décider en dernier ressort.

Ce scénario présente l'avantage de respecter l'équilibre actuel entre technologie et autorité humaine. Il est aussi le plus **socialement acceptable** : les spectateurs, joueurs et entraîneurs

continuent de voir l'arbitre comme le décideur ultime, tout en bénéficiant d'une plus grande précision.

À court terme, il est probable que ce modèle s'impose dans la majorité des sports, notamment ceux où l'interprétation humaine reste indispensable, comme l'escrime ou le judo.

### **5.5.2. L'hybridation progressive : la co-décision humain-machine**

Un second scénario est celui de l'**hybridation**, où l'IA devient un véritable co-décisionnaire. Elle ne se contente plus d'assister, mais participe activement à l'évaluation.

Dans la gymnastique, par exemple, le système Fujitsu attribue déjà une note objective basée sur la conformité biomécanique. L'arbitre humain peut ajuster cette note en fonction de critères esthétiques ou de marge d'appréciation. La décision finale est donc le produit d'une **collaboration entre l'IA et l'humain**.

Ce modèle hybride pourrait s'étendre à d'autres disciplines. En escrime, une IA pourrait déterminer la validité d'une touche et proposer une interprétation de la priorité, tandis que l'arbitre garderait la possibilité de valider ou d'infirmer la décision en tenant compte du contexte.

L'hybridation présente un double avantage : elle assure une plus grande objectivité tout en maintenant la légitimité humaine. Mais elle suppose une **formation accrue des arbitres**, qui devront apprendre à dialoguer avec les systèmes algorithmiques.

### **5.5.3. La substitution partielle : la machine comme juge**

Le troisième scénario, plus radical, est celui de la **substitution partielle**. Ici, l'IA prend directement certaines décisions, sans validation humaine.

Ce modèle est déjà en place dans des contextes simples et binaires : Hawk-Eye au tennis ou la goal-line technology au football en sont des exemples. Dans ces cas, la machine tranche seule car la décision ne laisse aucune place à l'interprétation : soit la balle a touché la ligne, soit non ; soit le ballon a franchi la ligne de but, soit non.

À l'avenir, ce modèle pourrait être élargi à d'autres disciplines, mais il reste délicat dans les sports d'interprétation. En escrime, par exemple, une IA pourrait valider automatiquement la touche, mais l'attribution du point en fonction de la priorité resterait du ressort humain.

Ce scénario soulève des enjeux de **légitimité culturelle** : si la machine remplace totalement l'arbitre dans certains rôles, comment préserver la symbolique de l'autorité arbitrale ?

### **5.5.4. Vers une explicabilité et une pédagogie renforcées**

Quelle que soit la trajectoire choisie, un enjeu transversal sera celui de l'**explicabilité**. Les décisions d'arbitrage par IA ne pourront pas être acceptées si elles sont perçues comme des « boîtes noires ».

On peut imaginer des systèmes capables de fournir en temps réel des explications visuelles aux spectateurs et aux athlètes. En escrime, par exemple :

- Une animation montrant la trajectoire des lames,
- Un schéma indiquant la priorité,
- Une justification textuelle simple (« attaque de gauche prioritaire, touche valable »).

Ces outils pédagogiques pourraient transformer l'expérience du spectateur, en rendant les décisions non seulement plus justes, mais aussi plus compréhensibles.

#### 5.5.5. Vers une régulation internationale

À moyen terme, l'adoption massive de l'IA en arbitrage nécessitera une **gouvernance internationale**. Comme pour la lutte antidopage, des instances mondiales devront fixer des standards :

- Quels types d'IA peuvent être utilisés en compétition ?
- Quels seuils de précision sont acceptables ?
- Quelle place doit rester à l'humain dans la validation finale ?

Le **CIO**, les fédérations internationales et les ligues professionnelles devront travailler ensemble pour éviter une fragmentation : si chaque sport ou chaque pays développe ses propres normes, la crédibilité globale des compétitions sera menacée.

#### 5.5.6. Horizons lointains : IA, réalité augmentée et jumeaux numériques

Enfin, à plus long terme, on peut envisager une convergence entre l'IA arbitrale et d'autres technologies émergentes :

- La **réalité augmentée** pourrait permettre aux arbitres de visualiser directement, dans leurs lunettes connectées, des trajectoires ou des zones de contact.
- Les **jumeaux numériques** des athlètes pourraient être utilisés pour simuler instantanément une action et vérifier sa conformité aux règles.

- Des systèmes de **détection biomécanique** pourraient identifier automatiquement les fautes invisibles à l'œil nu, comme un contact irrégulier au basket ou une saisie illégale en judo.

Ces évolutions transformeraient l'arbitrage en une **fonction techno-humaine intégrée**, où l'arbitre deviendrait autant un interprète qu'un gestionnaire de données en temps réel.

## 6. Discussion transversale

### 6.1. Comparaison des trois axes

L'analyse du mouvement par intelligence artificielle s'articule aujourd'hui autour de trois grands champs d'application : **la prévention des blessures**, **l'optimisation de la performance** et **l'assistance à l'arbitrage**. Ces trois domaines, bien que poursuivant des finalités distinctes, partagent un socle technologique commun : la capacité des algorithmes à **capturer, traiter et interpréter** des données issues du corps et des gestes sportifs.

#### 6.1.1. L'IA pour la prévention des blessures : protéger l'intégrité physique

Dans la prévention des blessures, l'IA se présente avant tout comme un **outil médical et prophylactique**. Elle vise à protéger la santé et la longévité des athlètes en anticipant les risques liés à la surcharge d'entraînement, aux déséquilibres biomécaniques ou aux antécédents médicaux.

- En musculation, des systèmes de vision par ordinateur (MediaPipe, MoveNet) détectent automatiquement les erreurs techniques comme le **valgus du genou** ou une **profondeur de squat insuffisante**, deux facteurs connus de blessure ligamentaire ou de déséquilibre musculaire.
- Dans le football ou le rugby, les capteurs GPS et accéléromètres intégrés aux gilets des joueurs mesurent les kilomètres parcourus, le nombre de sprints et les accélérations. Ces données sont analysées par des modèles prédictifs pour estimer le risque de blessure musculaire.
- En NBA, certaines équipes utilisent des systèmes d'IA pour prédire la probabilité de blessure d'un joueur en fonction de son temps de jeu cumulé et de son historique médical, ajustant ainsi la rotation des effectifs.

La finalité de cet axe est claire : préserver l'athlète en réduisant la probabilité d'arrêt prolongé. L'IA devient ici une forme de **médecine préventive**, au service de la santé physique et psychologique.

### 6.1.2. L'IA pour l'optimisation de la performance : repousser les limites

L'optimisation de la performance constitue un axe complémentaire. Il ne s'agit plus seulement d'éviter la blessure, mais de permettre à l'athlète d'atteindre et de dépasser son plein potentiel. L'IA agit ici comme un **levier d'amélioration continue**, en personnalisant l'entraînement, en perfectionnant les gestes techniques et en simulant des scénarios tactiques.

- En athlétisme, l'IA analyse la **foulée des coureurs** pour corriger les asymétries, améliorer l'efficacité énergétique et prévenir la dégradation technique en fin de course.
- Dans le tennis, elle mesure l'angle du coude et la rotation du tronc lors du service, offrant un retour chiffré qui permet d'optimiser la puissance et la précision.
- Dans le cyclisme, des modèles prédictifs estiment la cadence optimale en fonction du profil du parcours et de l'état de fatigue du coureur, afin de maximiser la performance tout en retardant l'apparition de la fatigue.

La finalité de cet axe est l'**excellence sportive**. L'IA ne se contente plus de protéger, elle propulse l'athlète vers une performance optimale en s'appuyant sur des données objectives.

### 6.1.3. L'IA pour l'assistance à l'arbitrage : garantir l'équité

Enfin, dans l'assistance à l'arbitrage, l'IA ne s'applique plus directement au corps de l'athlète, mais à l'**environnement compétitif**. Sa mission est de garantir l'équité et la justice sportive, en réduisant l'erreur humaine et en renforçant la transparence des décisions.

- En football, l'introduction de la **technologie semi-automatisée du hors-jeu** lors de la Coupe du monde 2022 a marqué une étape décisive. Grâce à un réseau de caméras et à un capteur dans le ballon, l'IA calcule la position des joueurs 50 fois par seconde, transmettant une alerte quasi instantanée aux arbitres vidéo.
- En gymnastique, les systèmes développés avec Fujitsu analysent directement les mouvements des athlètes pour attribuer des notes basées sur l'exactitude biomécanique des figures, réduisant ainsi la subjectivité du jugement.
- Dans l'escrime, discipline où la vitesse rend parfois les touches invisibles à l'œil nu, l'IA pourrait bientôt assister les arbitres en validant objectivement les coups portés grâce à l'analyse vidéo en temps réel.

La finalité de cet axe est la **justice sportive**. L'IA n'améliore pas l'athlète, mais le cadre compétitif, en réduisant les polémiques et en renforçant la confiance du public dans la régularité des compétitions.

#### 6.1.4. Trois finalités, un socle commun

Ces trois axes traduisent donc trois finalités distinctes :

- **Santé** (prévention des blessures),
- **Performance** (optimisation du potentiel),
- **Équité** (assistance à l'arbitrage).

Pourtant, ils mobilisent souvent des **méthodes similaires** : vision par ordinateur pour l'analyse gestuelle, modèles prédictifs pour anticiper la fatigue ou la blessure, jumeaux numériques pour simuler l'évolution d'un athlète ou la validité d'une action. Cette convergence technologique montre que l'IA constitue un **écosystème transversal**, dont les applications se déclinent selon les finalités visées.

## 6.2. Convergences et divergences

Bien que la prévention des blessures, l'optimisation de la performance et l'assistance à l'arbitrage poursuivent des objectifs différents, leur comparaison révèle de fortes convergences, mais aussi des divergences profondes qui expliquent la vitesse d'adoption variable de l'IA selon les domaines.

### 6.2.1. Les convergences

#### 1. Le rôle central de la donnée

Dans les trois cas, la donnée constitue le carburant indispensable.

- En prévention, il s'agit des **angles articulaires**, de la charge d'entraînement, ou encore de la fréquence cardiaque.
- En performance, ce sont les **données physiologiques** (VO<sub>2</sub> max, lactate sanguin), mais aussi psychologiques (motivation, résilience).
- En arbitrage, la donnée prend la forme de **vidéos multicaméras** ou de capteurs placés dans les ballons et sur les joueurs.

Quelle que soit la finalité, la collecte massive et fiable de données reste la condition sine qua non pour alimenter les algorithmes. Sans données de qualité, aucun modèle n'est capable de prédire ou de décider avec précision.

## 2. La prédiction comme finalité commune

L'IA n'est pas qu'un outil de description : elle se distingue par sa capacité à anticiper.

- Dans la prévention, il s'agit d'anticiper la **blessure à venir**.
- Dans la performance, de prédire la **baisse ou le pic de rendement**.
- Dans l'arbitrage, de déterminer instantanément la **validité d'une action litigieuse**.

Cette logique prédictive constitue un socle partagé : l'IA vise toujours à **réduire l'incertitude sur le futur**, que ce futur concerne la santé, la performance ou le résultat d'une action.

## 3. La complémentarité avec l'humain

Dans aucun cas, l'IA ne fonctionne de manière isolée. Elle agit comme un outil d'aide à la décision :

- Elle **complète l'œil de l'entraîneur** en fournissant des données invisibles à l'œil nu.
- Elle **soutient le médecin** en détectant des signaux faibles de fatigue ou de surcharge.
- Elle **appuie l'arbitre** en proposant une validation objective.

L'humain conserve la responsabilité ultime. Cette complémentarité est essentielle pour assurer l'acceptabilité sociale et maintenir la dimension humaine du sport.

## 6.2.2. Les divergences

### 1. La cible des bénéfices

- Dans la prévention, le bénéfice est **directement individuel** : protéger l'athlète et prolonger sa carrière.
- Dans la performance, le bénéfice est **à la fois individuel et collectif** : l'athlète progresse, et l'équipe en tire un avantage compétitif.
- Dans l'arbitrage, le bénéfice est **collectif et institutionnel** : il s'agit d'assurer la justice sportive, au bénéfice des spectateurs, des sponsors et des instances dirigeantes.

Cette différence de bénéficiaire explique aussi les priorités d'investissement : les clubs financent la performance, les fédérations soutiennent l'arbitrage, et les acteurs médicaux s'impliquent dans la prévention.

## 2. Le degré d'acceptabilité sociale

- La prévention est généralement **bien acceptée**, car elle est perçue comme protectrice. Les athlètes voient dans l'IA un allié de leur santé.
- L'optimisation de la performance est acceptée, mais suscite des débats dès lors qu'elle risque de franchir la frontière avec le **dopage technologique**. Une IA qui optimise le geste au-delà des capacités humaines naturelles soulève des interrogations sur l'équité sportive.
- L'arbitrage est la plus controversée : si la VAR ou le hors-jeu semi-automatisé réduisent les erreurs, ils remettent aussi en cause l'**autorité symbolique de l'arbitre**. Certains supporters perçoivent l'IA comme une déshumanisation du sport.

## 3. La temporalité de l'action

- La prévention adopte une **approche prospective**, orientée vers le futur : détecter aujourd'hui un risque qui se matérialisera demain.
- La performance repose sur une **approche continue**, dans le flux du quotidien : ajuster chaque séance, corriger chaque geste, optimiser progressivement.
- L'arbitrage exige une **approche instantanée** : la décision doit être rendue en temps réel, sous la pression de la compétition et du public.

Ces temporalités différentes conditionnent les choix technologiques : l'arbitrage requiert du **temps réel**, la prévention tolère un délai d'analyse, et la performance s'inscrit dans une logique d'optimisation permanente.

## 6.3. Enjeux éthiques, sociaux et technologiques

L'essor de l'intelligence artificielle dans le sport soulève un ensemble d'enjeux qui dépassent largement la simple dimension technologique. Les questions éthiques, sociales et techniques conditionnent non seulement l'acceptabilité de ces outils, mais aussi leur légitimité et leur durabilité.

### 6.3.1. Enjeux éthiques



## Confidentialité et propriété des données

Les données collectées par l'IA sont d'une nature particulièrement sensible : biomécaniques (angles articulaires, vitesse des gestes), physiologiques (fréquence cardiaque, VO<sub>2</sub> max, lactate sanguin), psychologiques (motivation, stress), mais aussi médicales (antécédents de blessures). Ces données constituent une véritable **empreinte sportive de l'athlète**, parfois plus révélatrice encore que son dossier médical.

Se pose alors une question centrale : à qui appartiennent-elles ?

- À l'athlète, qui est la source de ces données ?
- Au club ou à la fédération, qui finance la collecte et l'exploitation ?
- Aux entreprises technologiques, qui développent les capteurs et logiciels ?

Le Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) en Europe impose que l'athlète conserve un droit de regard sur l'usage de ses données, mais dans la pratique, de nombreux contrats sportifs incluent des clauses qui transfèrent partiellement ce contrôle. Le risque est que ces données soient utilisées à des fins commerciales (valorisation du joueur sur le marché des transferts, sélection discriminatoire lors d'un recrutement).

## Transparence et explicabilité

L'un des reproches majeurs adressés à l'IA est son opacité. Dans le sport, cette opacité est particulièrement problématique.

- Un athlète à qui l'on recommande du repos doit comprendre **pourquoi** l'IA l'oriente ainsi.
- Un entraîneur ne peut pas justifier un choix tactique en se limitant à dire que « l'IA l'a suggéré ».
- Un arbitre ne peut pas valider une décision contestée si l'IA ne fournit pas de justification intelligible.

D'où l'importance de l'**IA explicable (XAI)**, qui vise à rendre lisibles les critères de décision. Sans transparence, la confiance des acteurs — athlètes, entraîneurs, arbitres, spectateurs — risque d'être compromise.

## Équité et dopage technologique

L'utilisation de l'IA dans l'optimisation de la performance pose la question du **dopage technologique**. Où s'arrête l'assistance légitime, et où commence l'avantage injuste ?

L'exemple des chaussures à plaque de carbone en athlétisme illustre ce dilemme : bien que n'étant pas directement liées à l'IA, elles montrent comment une innovation technologique peut bouleverser l'équité compétitive. Avec l'IA, le risque est similaire : un athlète disposant d'outils

prédictifs avancés bénéficie-t-il d'un avantage artificiel ? Les fédérations devront fixer des limites claires pour éviter une escalade comparable à celle du dopage chimique.

### 6.3.2. Enjeux sociaux

#### Acceptabilité par les acteurs

L'intégration de l'IA dans le sport ne dépend pas seulement de son efficacité, mais aussi de son acceptabilité sociale.

- Les **entraîneurs** craignent parfois une perte d'autorité si les athlètes accordent plus de crédit aux recommandations algorithmiques qu'à leurs consignes.
- Les **arbitres** redoutent de voir leur rôle réduit à une simple validation d'alertes générées par la machine.
- Les **athlètes** peuvent percevoir la surveillance permanente comme une forme de contrôle excessif, générant du stress ou une impression de déshumanisation.

Le succès de l'IA sportive reposera donc sur sa capacité à être perçue non pas comme un substitut, mais comme un **outil collaboratif** qui valorise l'expertise humaine.

#### Impact sur la formation et les métiers du sport

L'arrivée de l'IA transforme également les compétences requises dans le sport. Les entraîneurs doivent acquérir des notions en **analyse de données** et en interprétation statistique. Les arbitres doivent apprendre à collaborer avec des outils semi-automatisés. Les médecins du sport doivent savoir intégrer des indicateurs algorithmiques dans leur diagnostic. Cela suppose une **reconfiguration des cursus de formation**, avec une hybridation entre sciences du sport et sciences informatiques.

#### Inégalités d'accès

Un autre enjeu social majeur concerne l'**inégalité d'accès aux technologies**. Les clubs professionnels riches disposent des moyens nécessaires pour investir dans des systèmes complexes (caméras multicaéras, serveurs de calcul, capteurs biomécaniques sophistiqués). Les clubs amateurs ou les disciplines moins médiatisées en sont exclus, faute de ressources.

Ce fossé technologique risque de renforcer les inégalités déjà existantes dans le sport, en accentuant la domination des clubs et des pays les plus riches. La démocratisation via les smartphones et les applications grand public constitue une piste, mais elle reste encore limitée par rapport aux infrastructures lourdes utilisées dans le sport de haut niveau.

### 6.3.3. Enjeux technologiques

#### Robustesse et fiabilité

Les modèles d'IA développés en laboratoire se heurtent souvent à la complexité du terrain. Une variation de luminosité dans un stade, une caméra légèrement mal placée, un bruit de

capteur, ou encore un mouvement atypique non prévu dans le dataset d'entraînement peuvent entraîner des erreurs. L'**écart entre la performance théorique et la robustesse pratique** demeure un défi majeur.

### Interopérabilité et standardisation

Les systèmes d'IA doivent s'intégrer dans des environnements techniques déjà très complexes. En football, par exemple, il faut coordonner les flux issus des caméras de diffusion, des capteurs GPS, des cardiofréquencemètres et des bases de données médicales. L'absence de standards internationaux complique cette interopérabilité. Certains clubs se retrouvent avec des solutions fragmentées, difficiles à faire dialoguer entre elles.

### Temps réel et contraintes opérationnelles

Certaines applications, comme l'arbitrage, exigent des décisions en quelques secondes. Or, de nombreux algorithmes restent coûteux en calcul et ne sont pas toujours compatibles avec une analyse temps réel. Le passage de l'analyse différée (en laboratoire ou en post-match) à l'analyse immédiate sur le terrain est un défi technologique crucial.

L'optimisation de la performance rencontre un problème similaire : un feedback immédiat pendant une séance peut transformer l'efficacité de l'entraînement, mais il suppose une puissance de calcul embarquée ou une connexion stable au cloud, ce qui n'est pas toujours garanti.

## 6.4. Perspectives globales

L'évolution rapide des technologies d'intelligence artificielle laisse entrevoir des transformations profondes du sport dans les années à venir. Les trois axes étudiés — prévention des blessures, optimisation de la performance et assistance à l'arbitrage —, bien que distincts aujourd'hui, tendent à converger dans des systèmes intégrés capables de répondre simultanément à plusieurs finalités. Ces perspectives globales dessinent un futur où l'IA ne sera plus seulement un outil spécialisé, mais un **acteur central de l'écosystème sportif**.

### 6.4.1. Vers une intégration multi-axe

Les frontières entre prévention, performance et arbitrage sont appelées à s'estomper.

On peut envisager des dispositifs uniques, capables de répondre en parallèle à plusieurs besoins :

- Corriger la **technique** d'un athlète en entraînement (axe performance),
- Détecter un **risque de blessure** associé à un geste répétitif (axe prévention),
- Valider la **légalité d'une action** lors d'une compétition (axe arbitrage).

Un exemple prospectif pourrait être celui de l'**escrime** : un même système d'analyse vidéo pourrait à la fois signaler un risque biomécanique de blessure (prévention), fournir un retour technique sur la précision et la vitesse du geste (performance), et valider en temps réel la touche en compétition (arbitrage). L'intégration multi-axe serait ainsi synonyme d'**efficacité et de mutualisation des infrastructures**, réduisant les coûts et augmentant l'accessibilité.

#### 6.4.2. Vers des jumeaux numériques complets

La notion de **jumeau numérique** va probablement s'imposer comme l'un des paradigmes centraux du sport de demain. Actuellement, ces avatars virtuels reproduisent essentiellement la dimension biomécanique ou physiologique d'un athlète. Mais à terme, ils pourraient intégrer :

- Des données **psychologiques** (niveau de stress, motivation, résilience),
- Des variables **contextuelles** (conditions environnementales, type d'adversaire),
- Des scénarios d'**arbitrage**, simulant l'impact de certaines décisions sur l'issue d'une compétition.

Ces jumeaux numériques complets permettraient de simuler non seulement des entraînements ou des compétitions, mais aussi des trajectoires de carrière, en anticipant l'impact cumulatif des charges, des blessures potentielles et des choix stratégiques.

Un footballeur pourrait ainsi évaluer l'effet de trois saisons consécutives avec un calendrier surchargé, tandis qu'un gymnaste pourrait tester l'impact de nouvelles règles de notation sur sa stratégie de composition. Le jumeau numérique deviendrait un **outil de planification globale**, à la fois médical, technique et stratégique.

#### 6.4.3. Vers une démocratisation de l'IA sportive

Si l'IA reste aujourd'hui concentrée dans le sport professionnel, plusieurs tendances technologiques ouvrent la voie à une démocratisation progressive :

- La **miniaturisation des capteurs** (bracelets connectés, semelles intelligentes, vêtements biométriques),
- La puissance croissante des **smartphones** capables de réaliser des analyses de vision par ordinateur sans serveur externe,
- L'essor du **cloud computing** et de l'IA embarquée, qui rendent accessibles à faible coût des traitements autrefois réservés à des infrastructures coûteuses.

À terme, chaque sportif amateur pourrait bénéficier d'un **suivi personnalisé**, accessible depuis une simple application. Un coureur du dimanche pourrait être averti que sa foulée présente une asymétrie risquée, un joueur de tennis amateur pourrait recevoir un feedback sur son service, et un pratiquant de musculation pourrait obtenir un retour immédiat sur sa posture au squat.

Cette démocratisation aurait un impact considérable sur la **santé publique**, en réduisant les blessures liées à la pratique amateur et en favorisant une progression encadrée. Mais elle suppose aussi une réflexion sur la **pédagogie** : comment vulgariser les retours de l'IA pour qu'ils soient compris et acceptés par des pratiquants non spécialistes ?

#### 6.4.4. Vers une gouvernance éthique et internationale

L'essor de l'IA dans le sport nécessitera une gouvernance claire et partagée à l'échelle mondiale. Plusieurs enjeux devront être réglés :

- **La protection des données**, en garantissant que les informations biométriques restent sous le contrôle des athlètes.
- **L'équité technologique**, pour éviter qu'un athlète ou une équipe bénéficiant de moyens financiers considérables ne dispose d'un avantage injuste.
- **La transparence et l'explicabilité**, afin que les décisions arbitrales ou médicales issues de l'IA puissent être comprises et acceptées.

Les fédérations internationales (CIO, FIFA, World Athletics) auront un rôle clé dans la définition de standards, de certifications et de limites claires. À l'image de la lutte antidopage, on peut envisager la mise en place d'une "**agence mondiale de régulation de l'IA sportive**", chargée de garantir que la technologie reste au service du sport et de ses valeurs fondamentales.

#### 6.4.5. Vers des horizons technologiques élargis

Enfin, il est probable que l'IA sportive ne se développera pas seule, mais en **synergie avec d'autres technologies émergentes** :

- La **réalité augmentée** pourrait fournir aux athlètes des retours visuels instantanés sur leurs gestes, directement projetés dans leur champ de vision.
- Les **neurosciences** pourraient être couplées à l'IA pour analyser l'activité cérébrale en temps réel, améliorant la concentration et la prise de décision.
- La **médecine prédictive** pourrait utiliser l'IA pour anticiper non seulement les blessures, mais aussi l'évolution à long terme de la santé des athlètes, intégrant ainsi sport et prévention médicale dans une approche unifiée.

Ces convergences pourraient transformer le sport en un **écosystème technologique intégré**, où chaque dimension — physique, mentale, technique, médicale, stratégique — serait analysée et optimisée en continu.

#### 6.4.6. Synthèse

Les perspectives globales de l'IA sportive sont donc multiples : convergence des axes, émergence de jumeaux numériques complets, démocratisation auprès des amateurs, gouvernance internationale et synergies avec d'autres technologies. Ces évolutions annoncent un futur où l'IA ne sera plus une aide ponctuelle, mais un **partenaire permanent**, intégré dans toutes les dimensions de la pratique sportive.

La question centrale restera de savoir comment préserver l'**équilibre entre innovation et humanité**. Car si l'IA peut rendre le sport plus sûr, plus performant et plus juste, il appartiendra aux institutions, aux entraîneurs et aux athlètes de veiller à ce qu'elle reste au service du jeu, et non l'inverse.

## 7. Conclusion

Ce mémoire avait pour ambition d'examiner de manière approfondie les apports, les limites et les perspectives de l'intelligence artificielle (IA) appliquée au sport, en particulier autour de trois axes majeurs : la prévention des blessures, l'optimisation de la performance et l'assistance à l'arbitrage. Ces trois dimensions, bien que distinctes dans leurs objectifs immédiats, s'articulent autour d'un enjeu commun : accompagner l'évolution du sport moderne vers davantage de précision, de sécurité et d'équité, sans pour autant renoncer à son essence profondément humaine.

**Un premier enseignement fort** de cette recherche réside dans la capacité de l'IA à transformer la prévention des blessures. Là où les méthodes traditionnelles reposaient essentiellement sur l'observation humaine et l'expérience des entraîneurs, l'IA permet désormais d'analyser massivement des données biomécaniques, physiologiques et contextuelles afin de détecter des signaux faibles imperceptibles à l'œil nu. Les exemples présentés – du squat en musculation au « Digital Athlete » de la NFL – démontrent que la prédiction et la personnalisation ne relèvent plus de la science-fiction mais s'imposent comme des outils concrets de terrain. Cette évolution fait passer la prévention d'une logique réactive, centrée sur le traitement de la blessure une fois survenue, à une logique proactive et prédictive visant à protéger l'athlète en amont. Toutefois, les défis méthodologiques restent nombreux : rareté des données de blessure, déséquilibre des classes, variabilité interindividuelle et nécessité de calibrer finement les modèles pour éviter à la fois la sur-alerte et la banalisation des risques. L'avenir de ce champ dépendra de la capacité des chercheurs et praticiens à combiner rigueur scientifique, qualité des données et explicabilité des modèles pour garantir la confiance des athlètes et des staffs.

**Un deuxième apport majeur** tient à l'optimisation de la performance. L'IA ne se contente plus de décrire ce qui a été fait ; elle tend vers une fonction prescriptive, proposant des ajustements personnalisés d'entraînement, de récupération ou de stratégie. Les jumeaux numériques d'athlètes, les modèles de pacing en endurance ou encore les analyses techniques en natation et en sports de raquette illustrent cette révolution. L'intérêt ne réside pas uniquement dans l'amélioration brute des performances, mais aussi dans l'individualisation des programmes : chaque athlète est considéré dans sa singularité physiologique, biomécanique et psychologique. Toutefois, l'intégration de ces outils dans les pratiques quotidiennes n'est pas sans obstacles. La complexité des modèles, les biais de données, l'inégalité d'accès entre sport professionnel et amateur ou encore la crainte d'une déshumanisation du coaching constituent autant de freins à surmonter. Le défi est de concevoir des outils réellement utilisables, compréhensibles et adaptés aux besoins opérationnels des entraîneurs et athlètes, sans tomber dans le piège d'une sur-technologisation qui éloignerait le sport de sa dimension humaine.

**Le troisième axe**, celui de l'arbitrage, met en lumière des enjeux à la fois techniques, sociaux et symboliques. L'arbitre occupe une place singulière dans l'univers sportif : il est garant de l'équité, mais aussi incarnation d'une autorité humaine qui structure le jeu. L'IA, en venant assister ou parfois remplacer partiellement l'arbitre, bouleverse cette symbolique. Les exemples du hors-jeu semi-automatisé au football, du système Hawk-Eye au tennis ou des expérimentations en gymnastique et en escrime montrent que l'IA peut apporter cohérence, rapidité et transparence. Mais ils révèlent aussi des tensions persistantes : interruption du jeu, contestations malgré la machine, sentiment de perte d'humanité dans la décision. L'entretien avec David Bucquet a mis en évidence que l'IA, en escrime notamment, ne saurait être acceptée que comme un outil de cohérence et d'appui, et non comme substitut total. La légitimité de l'arbitre doit rester intacte, au risque sinon de fragiliser la confiance des athlètes et du public. Ainsi, l'arbitrage constitue sans doute le terrain où la dimension éthique et symbolique est la plus forte : plus qu'une question de performance technique, c'est une interrogation sur ce que l'on accepte comme « justice sportive ».

**De manière transversale**, ce mémoire a aussi montré que l'IA dans le sport ne peut être pensée indépendamment de ses défis et limites. La robustesse en conditions réelles, la représentativité des données, l'explicabilité des modèles, la protection des données personnelles, l'équité d'accès entre sportifs professionnels et amateurs ou encore l'empreinte environnementale des solutions constituent des points de vigilance incontournables. L'IA n'est pas neutre : elle façonne les pratiques, redistribue les responsabilités et introduit de nouvelles formes de dépendance technologique. Sa diffusion massive ne pourra être acceptée et durable qu'à la condition d'être encadrée par une gouvernance claire, une pédagogie constante et une conception véritablement centrée sur l'humain.

**Enfin, au-delà des résultats techniques**, cette réflexion interroge le sens même de l'évolution du sport. L'IA est un formidable outil, mais elle ne doit pas devenir une fin en soi. Le sport n'est pas qu'une affaire de chiffres et d'algorithmes ; il repose aussi sur l'imprévisible, l'émotion, la créativité, la capacité de l'humain à se transcender au-delà des modèles. L'introduction de l'IA dans les pratiques sportives doit donc être pensée comme un moyen d'amplifier le potentiel

humain, non de l'éclipser. L'enjeu est de trouver un équilibre entre technologie et humanité, entre précision algorithmique et spontanéité du jeu. C'est à cette condition que l'IA pourra s'imposer comme un allié durable du sport, et non comme une menace à son essence.

**En conclusion**, l'intelligence artificielle constitue une opportunité majeure pour le sport du XXI<sup>e</sup> siècle. Elle promet d'anticiper les blessures, de personnaliser les entraînements, d'optimiser les performances et de renforcer l'équité des compétitions. Mais elle impose aussi une vigilance accrue quant à ses limites techniques, ses biais sociaux et ses implications éthiques. Le chemin vers une adoption généralisée est encore long, et il nécessitera une collaboration étroite entre chercheurs, ingénieurs, entraîneurs, athlètes, arbitres et instances dirigeantes. Plus qu'une révolution technologique, l'IA dans le sport représente un projet collectif : celui d'inventer un modèle où la donnée, la machine et l'humain dialoguent harmonieusement pour faire progresser non seulement la performance, mais aussi la santé, l'équité et le sens même du sport.



# Bibliographie

## Articles scientifiques

**Reis, A., et al. (2024).** Artificial intelligence and Machine Learning approaches in sports: Concepts, applications, challenges, and future perspectives. *Brazilian Journal of Physical Therapy*. Elsevier.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11215955/>

→ État de l'art sur les applications de l'IA en sciences du sport (blessures, performance). Utile pour poser le cadre théorique et souligner les défis (qualité des données, explicabilité).

**Musat, A., Popescu, M., & Ionescu, C. (2024).** Diagnostic Applications of AI in Sports: A Comprehensive Review of Injury Risk Prediction Methods. *Diagnostics*, 14(22), 2516. MDPI.

<https://www.mdpi.com/2075-4418/14/22/2516>

→ Revue complète sur l'IA appliquée à la prédiction et prévention des blessures sportives. Pertinent pour discuter les méthodes ML utilisées et leurs limites.

**Qin, Y., Zhang, H., & Li, X. (2025).** Predictive athlete performance modeling with machine learning and biometric data integration. *Scientific Reports*. Nature.

<https://www.nature.com/articles/s41598-025-01438-9>

→ Étude proposant un modèle prédictif hybride (données physiologiques et psychologiques). Intéressant pour l'axe « optimisation de la performance ».

**Cordeiro, D., O'Connor, N., & Moran, K. (2025).** A synthetic data-driven machine learning approach for athlete performance attenuation prediction. *Frontiers in Sports and Active Living*, 7.

<https://www.frontiersin.org/journals/sports-and-active-living/articles/10.3389/fspor.2025.1607600/full>

→ Article innovant sur la génération de données synthétiques pour pallier le manque de données en sport. Utile pour traiter la question de la charge de travail et de la prévention indirecte des blessures.

**Protschky, S., Müller, F., & Schäfer, T. (2025).** Integrating Artificial Intelligence into Football Refereeing: Insights from German Bundesliga Referees. *Proceedings of ECIS 2025*.

<https://aisel.aisnet.org/ecis2025/digisports/digisports/1/>

→ Étude qualitative sur la perception des arbitres face à l'IA. Intéressant pour discuter de l'acceptabilité sociale dans l'arbitrage assisté.

**Zhou, W., & Liu, J. (2025).** Artificial intelligence in sport: A narrative review of applications, challenges and future trends. *Journal of Sports Sciences*. Taylor & Francis.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40518658/>

→ Revue narrative transversale couvrant blessures, performance et arbitrage. Utile pour relier les trois axes du mémoire.

## Rapports & institutions

**Zone7 & Global Performance Insights (Clubb, J. et al.). (2023).** *Applications of Artificial Intelligence Within High Performance Sport*. Zone7.

<https://zone7.ai/performance/additional-resources/free-report-applications-of-artificial-intelligence-within-high-performance-sport/>

→ Livre blanc professionnel décrivant l'usage de l'IA pour prédire blessures et gérer la charge. Sert de pont entre théorie académique et pratiques de terrain.

**Fédération Internationale de Football Association (FIFA). (2022).** *Semi-automated offside technology to be used at FIFA World Cup 2022™*.

<https://inside.fifa.com/media-releases/semi-automated-offside-technology-to-be-used-at-fifa-world-cup-2022-tm>

→ Rapport officiel sur le hors-jeu semi-automatisé. Exemple concret d'IA appliquée à l'arbitrage en compétition internationale.

**Miller, J. & National Football League (NFL). (2025).** Tackling Injuries With AI: The NFL's Jeff Miller. *MIT Sloan Management Review – Podcast Me, Myself, and AI*.

<https://sloanreview.mit.edu/audio/tackling-injuries-with-ai-the-nfls-jeff-miller/>

→ Entretien sur le projet « Digital Athlete » de la NFL. Exemple à grande échelle d'utilisation de l'IA pour la prévention des blessures.

## Podcasts & conférences

**Massey, C. (2025).** How Big Data and AI Are Transforming Modern Sports. *Wharton Business Daily – Knowledge@Wharton*.

<https://knowledge.wharton.upenn.edu/podcast/this-week-in-business/how-big-data-and-ai-are-transforming-modern-sports/>

→ Podcast synthétique couvrant blessures, performance et arbitrage. Utile pour replacer les trois axes dans une perspective globale.

**MIT Sloan Sports Analytics Conference. (2025).** Gymnastics' Rebalancing Act: AI Judging, Analytics, and Economics.

<https://www.sloansportsconference.com/event/gymnastics-rebalancing-act-ai-judging-analytics-and-economics>

→ Panel sur l'arbitrage assisté en gymnastique. Permet de comparer avec l'escrime et de discuter des limites d'un arbitrage automatisé.

**MIT Sloan Sports Analytics Conference. (2024).** Winning With AI: The Future of AI in Sports.

<https://www.sloansportsconference.com/event/winning-with-ai-the-future-of-ai-in-sports>

→ Discussion entre experts (AWS, ESPN, etc.) sur le futur de l'IA dans le sport. Donne une vision prospective utile pour la conclusion du mémoire.

## Ouvrages académiques

**Dindorf, C., et al. (Eds.). (2024).** *Artificial Intelligence in Sports, Movement, and Health*. Springer.

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-67256-9>

→ Ouvrage collectif couvrant biomécanique, santé et performance. Base solide pour le cadre théorique.

**Blondin, M. J., Fister Jr, I., & Pardalos, P. (Eds.). (2025).** *Artificial Intelligence, Optimization, and Data Sciences in Sports*. Springer.

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-76047-1>

→ Recueil orienté optimisation et modélisation en IA appliquée au sport. Intéressant pour aborder l'axe performance et les perspectives techniques.