



HAL
open science

Produire et répéter les efforts de haute intensité en rugby à xv, effets sur la performance en situation de compétition

Paul Glaise

► **To cite this version:**

Paul Glaise. Produire et répéter les efforts de haute intensité en rugby à xv, effets sur la performance en situation de compétition. Son [cs.SD]. Université Claude Bernard - Lyon I, 2023. Français. NNT : 2023LYO10285 . tel-04844023

HAL Id: tel-04844023

<https://theses.hal.science/tel-04844023v1>

Submitted on 17 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THESE de DOCTORAT DE
L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1**

**Ecole Doctorale N° 205
Ecole Doctorale Interdisciplinaire Sciences Santé**

Discipline : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

Soutenue publiquement le 15/12/2023, par :

Paul Glaise

**Produire et répéter les efforts de haute
intensité en rugby à xv, effets sur la
performance en situation de
compétition**

Devant le jury composé de :

M. Jean-Benoît MORIN (Examineur)

Mme. Nathalie BOISSEAU (Rapporteuse)

M. Nicolas BABAULT (Rapporteur)

Mme Claire THOMAS-JUNIUS (Présidente)

M. Christophe HAUTIER (Examineur)

M. Cyril MARTIN (Directeur de thèse)

PU Université Jean Monnet, Saint-Etienne

PU Université Clermont Auvergne

PU Université de Bourgogne, Dijon

PU Université d'Evry Paris Saclay

PU Université Lyon 1

MCF Université Lyon 1

Remerciements

L'ensemble des recherches décrites dans ce document a été menée en collaboration tripartite avec l'Union Sportive Bressane Pays de l'Ain rugby et le Laboratoire Interuniversitaire de la Biologie et de la Motricité (EA 7424) de l'université Lyon 1 dans le cadre d'une convention CIFRE.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont accompagné dans ce projet de thèse. Leur soutien, leur expertise et leur encouragement ont joué un rôle essentiel dans la concrétisation de ce travail de recherche.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de thèse, **Cyril Martin**, pour sa supervision précieuse. Ton accompagnement indéfectible doublé de tes conseils avisés et de tes connaissances expertes m'ont orienté vers un haut niveau d'exigence et de rigueur tout au long de ce projet. Au-delà, du directeur de thèse, je voudrais aussi remercier la personne, avec ses valeurs et sa personnalité auxquelles j'ai immédiatement adhéré, car un projet comme celui-ci est avant tout une histoire d'homme. J'espère que l'avenir nous réserve encore de beaux projets scientifiques à partager.

J'adresse également mes remerciements à **Nathalie Boisseau** et **Nicolas Babault**, pour avoir accepté de lire et d'évaluer ce travail dans l'exigeant rôle de rapporteur. Leurs commentaires constructifs ont grandement enrichi ce document.

Merci à **Claire Thomas-Junius**, **Christophe Hautier** et **Jean-Benoît Morin** de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être membres du jury.

Un grand merci au club de l'**USBPA**, aux dirigeants, entraîneurs, analystes, préparateurs physiques et autres salariés (commerciaux, communication, comptabilité...) de m'avoir permis de réaliser ce projet dans les meilleures conditions possibles. Merci à **Thomas Choveau**, de m'avoir permis de rejoindre le club et pour nos échanges passionnés, je sais que nous partageons la même vision et je ne doute pas que nos chemins professionnels se recroiseront. Merci à toi, **Brice Cornu**, de m'avoir pris sous ton aile et de m'avoir aidé tout au long de ce projet. Notre

complémentarité a été une source d'enrichissement précieuse. Merci à **Alexis Lalarme** pour tout son travail d'analyse qui a été un véritable support de cette thèse. Enfin, merci à **Yoann Boulanger** d'avoir cru en ce projet, grâce à toi j'ai appris qu'une grande liberté pouvait engendrer une grande responsabilité. A tous, je salue particulièrement votre ouverture d'esprit et votre confiance en moi lorsque vous avez accepté que je fasse mes expériences sur l'équipe professionnelle. Tous les moments que nous avons traversés ensemble, des repas au verchère au titre de champion de France en passant par des montées en Pro D2, mais aussi par les descentes ont été une inestimable source d'enrichissement personnel et académique.

Je tiens à remercier tous les joueurs professionnels du club qui ont participé à ces recherches. Votre confiance, votre engagement et votre coopération ont été essentiels pour la réussite de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble des collègues du LIBM, et plus particulièrement à **Isabelle Rogowski, Pierre Samozino, Baptiste Morel et Jean-Benoît Morin** pour avoir contribué à mes recherches. C'est un immense privilège d'avoir pu profiter de votre expertise scientifique. J'ai attaché beaucoup d'importance à vos conseils qui ont élargi mes horizons scientifiques.

Je n'oublie pas ma famille et mes amis qui m'ont apporté leur soutien infaillible tout au long de ce voyage. Merci à mes parents, **Anne et Pierre**, d'avoir fait tant de sacrifices depuis si longtemps pour nous mettre, mon frère et moi, dans les meilleures dispositions possibles dans nos vies personnelles et professionnelles. Un grand merci également à toi **Déborah**, pour ton dévouement absolu tout au long de ce projet scientifique et pour tous les efforts que tu as su faire. Je resterai à jamais admiratif de ton engagement. Merci au reste de la famille, d'avoir fait de cette dernière un sol solide sur lequel nous avons tous grandi, chacun de nous apportant sa pierre à notre édifice commun.

Ce travail représente une étape significative de ma vie, et je suis profondément reconnaissant envers chacun d'entre vous pour avoir rendu cela possible.

Liste des abréviations

30-15 IFT: 30-15 Intermittent Fitness Test

AE : Arrière extérieur

AI : Arrière Intérieur

ATP: Adenosine triphosphate

BIP: Ball in Play

C : Centre

CAC : Centre d'Analyse Cinématique

CD : Cinq de Devant

CK : Créatine Kinase

CMJ : Counter Movement Jump

CP : Champ Profond

D : Demis

DL : Deuxième Ligne

DM : Demi de Mêlée

Dm : Dry muscle

DO: Demi d'ouverture

DRF: Decrease rate of force

EMG : Electromyogramme

ES : Effect Size

F₀: Force maximale théorique

FC : Fréquence Cardiaque

Fmax: Force maximale

GPS: Global Positioning System

HIIT: High Intensity Interval Training

HIT: High Intensity Training

IMTP: Isometric Mid-Thigh Pull

KPI: Key Performance Indicator

MCT : Transporteurs de monocarboxylates

MIT : Moderate Intensity Training

NS : Non Significatif

P : Pilier

PCr : Phospho Créatine

PDC : Poids Du Corps

PH : Potentiel Hydrogène

PI : Phosphate Inorganique

Pmax : Puissance maximale

Pmoy : Puissance moyenne

Profil FV : Profil Force/Vitesse

RFD: Rate of Force Development

RFmax: maximal rate of force

RHIE: Repeated High intensity effort

RHIEa: Repeated High intensity effort ability,

RM: Répétition Maximale

RMS: Root Mean Square

RPE: Rating of Perceived Exertion

RS²: Rugby-Specific Repeated-Speed

RSa: Repeated Sprint ability

RSE: Repeated Sprint Exercise

Sfv: Slope of force-velocity

SJ: Squat Jump

T : Talonneur

TL : Troisième Ligne

V₀: Vitesse maximale théorique

VBT : Velocity Based Training

VMA : Vitesse Maximale Aérobie

Vmax : Vitesse maximale

VMI : Vitesse Maximale Intermittente

VO₂max: Consommation maximale d'oxygène

WAT: Wales Anaerobic Test

YYIRT: Yo-Yo Intermittent Recovery Test

Liste des figures

Figure 1. Représentation des différents postes en rugby à XV.....	23
Figure 2. Phases de jeu en rugby à XV	24
Figure 3. Occurrence des efforts de contact quantifiés par accéléromètre en fonction des postes de jeu lors d'un match de rugby à XV d'après Sheehan et al., 2022.	39
Figure 4. Nombre de RHIE en match en fonction du poste et du niveau de compétition (European Rugby Champions Cup ; ERCC vs TOP 14).	45
Figure 5. Différences moyennes (%) de force au back squat (1RM) en fonction du niveau de jeu d'après Smart et al., 2013.	61
Figure 6. Vitesse maximale atteinte ($m.s^{-1}$) lors d'un sprint de 30m en fonction du niveau de compétition des joueurs de rugby à XV d'après Watkins et al., 2021.....	65
Figure 7. Relations force-vitesse et puissance vitesse mesurée lors d'un sprint de 30m.....	66
Figure 8. Relation force-vitesse d'après le modèle d' Hill.	73
Figure 9. Relations Force-Vitesse et Puissance-vitesse pour un joueur avant et arrière.	74
Figure 10. Force maximale théorique horizontale (F_0 , N) en fonction du niveau de compétition en rugby à XV d'après Watkins et al., 2021.	83
Figure 11. Contribution énergétique lors du premier sprint et du dernier sprint d'un effort de sprint répété. D'après Girard et al., 2011.....	89
Figure 12. Représentation schématique du Repeated effort Ability test d'après Johnston et Gabbett 2011.	98
Figure 13. Représentation schématique du repeated high-intensity exercise performance test d'après Austin et al., 2013.	99
Figure 14. Représentation schématique du repeated high-intensity exercise test d'après Gabbett et al., 2015.	100
Figure 15. Représentation schématique du repeated high-intensity exercise test d'après Vachon et al., 2020.	101

Liste des tableaux

Table 1. Caractéristiques techniques de la CAC utilisée pour la thèse	26
Table 2. Seuils de vitesse absolus et relatifs utilisés en rugby à XV.	28
Table 3. Synthèse des connaissances sur les RHIE en rugby.	48
Table 4. Caractéristiques anthropométriques des joueurs de rugby à XV.	54
Table 5. Niveaux de force maximale en rugby à XV	56
Table 6. Temps au sprint des joueurs de rugby à XV sur différentes distances en fonction du poste.	62
Table 7. Synthèse des caractéristiques de puissance du bas du corps chez les joueurs de rugby	68
Table 8. Synthèse des caractéristiques de puissance du haut du corps chez les joueurs de rugby	70
Table 9. Variables mécaniques issues de la relation force-vitesse en sprint (Morin et Samozino., 2016)	76
Table 10. Synthèse des connaissances des données force vitesse en sprint en rugby	78
Table 11. Capacité à répéter des sprints des joueurs de rugby.....	85
Table 12. Méthodes d'évaluation de la RSa utilisées en rugby.	88
Table 13. Capacité à répéter des efforts de haute intensité en rugby.	96
Table 14. Aptitudes aérobies des joueurs de rugby en fonction du poste.	103

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	13
REVUE DE LITTERATURE	20
1. Une histoire brève du rugby.....	21
2. Description de l'activité de rugby à XV	22
2.1. Généralités du jeu et principes fondamentaux	22
2.2. Phases de jeu	23
3. Exigences physiques du rugby à XV	24
3.1. Méthodes d'évaluation de l'activité des joueurs en match.....	24
3.1.1. Centrales d'analyse cinématique (« GPS »)	25
3.1.1.1. Fonctionnement général.....	25
3.1.1.2. Les variables mesurées par la CAC	26
3.1.2. L'analyse vidéographique	31
3.2. Caractérisation générale des exigences physiologiques et mécaniques en rugby à XV	31
3.2.1. Temps de jeu	31
3.2.2. Ratio d'effort/Ratio d'activité	32
3.2.3. Caractéristiques de déplacement	33
3.2.4. Courses à intensité sous maximale	34
3.2.5. Courses d'intensité maximale (sprint).....	35
3.2.6. Accélérations et décélérations	37
3.2.7. Contacts & activité combattue	38
3.2.8. Contraintes d'application de force horizontale	40
3.3. Répétition d'efforts à haute intensité	41
3.3.1. Répétition de sprints (RSE) et Capacité à répéter des sprints (RSa) 41	
3.3.1.1. Définitions	41
3.3.1.2. Relation entre la RSa et la performance en match.....	41
3.3.2. Répétition d'efforts à haute intensité (RHIE) et Capacité à répéter des efforts de haute intensité (RHIEa).....	42
3.3.2.1. Définitions	42
3.3.2.2. Occurrence des RHIE en compétition	43
3.3.2.3. Durée des séquences RHIE en compétition.....	45

3.3.2.4. Composition des séquences RHIE en compétition	46
3.3.3. Fatigue lors d'un match de rugby à XV	50
4. Caractéristiques du joueur de rugby à XV	52
4.1. Caractéristiques anthropométriques.....	52
4.2. Caractéristiques physiologiques et biomécaniques.....	55
4.2.1. Force maximale	55
4.2.2. Vitesse de course	61
4.2.3. Puissance maximale.....	65
4.2.4. La relation Force-vitesse :	72
4.2.4.1. Quelques bases théoriques.....	72
4.2.4.2. Relation force-vitesse en sprint	75
4.2.4.3. La relation Force-vitesse en rugby	76
4.2.5. Capacité à répéter des sprints	84
4.2.5.1. Evaluation de la RSa.....	87
4.2.5.2. Aspects énergétiques des RSE.....	89
4.2.5.3. Déterminants de la performance lors d'un RSE	90
4.2.6. Capacité à répéter des efforts de haute intensité (RHIEa)	94
4.2.6.1. Évaluation de la RHIEa	97
4.2.7. Aptitudes aérobies	101
4.2.8. Aptitudes énergétiques anaérobies	106
4.3. Développement de la capacité à répéter des sprints ou des efforts de haute intensité.....	107
4.3.1. Développement de RSa.....	107
4.3.1.1. Les méthodes d'entraînement aérobic continu et intermittent.....	107
4.3.1.2. Les méthodes d'entraînement en résistance.....	107
4.3.1.3. Les méthodes d'entraînement en force et en vitesse	108
4.3.1.4. Les méthodes d'entraînement en RSE.....	108
4.3.2. Développement de RHIEa	109
5. Synthèse et objectifs de travail	110
TRAVAUX EXPERIMENTAUX	113
Axe 1 : Produire les efforts de haute intensité.....	114
Étude 1. Relations entre les capacités de production de force horizontale en sprint et l'efficacité technique des efforts de contact en situation de compétition.	114
Axe 2 : Répéter les efforts de haute intensité.....	126

Étude 2. Influence de la capacité à répéter des sprints sur les profils d'activité en match des joueurs de rugby semi-professionnels en fonction de leurs postes.	126
Étude 3. Altération de la performance au cours d'une répétition d'effort de haute intensité dans des conditions variées de force et de vitesse chez des joueurs de rugby professionnels	138
Axe 3 : Développer la capacité à répéter les efforts de haute intensité	163
Étude 4. Effets de l'entraînement en RHIE ou de l'entraînement en RSE sur la capacité à répéter les efforts de haute intensité et sur la performance en match chez les joueurs de rugby professionnels.	163
DISCUSSION GENERALE	189
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	196
BIBLIOGRAPHIE	200

Diffusion des résultats

Cette thèse a donné lieu à la soumission ou à la publication de quatre articles dans des revues scientifiques internationales :

Glaise, P., Morel, B., Rogowski, I., Cornu, B et Martin, C. 2022. « Influence of Repeated-Sprint Ability on the in-Game Activity Profiles of Semiprofessional Rugby Union Players According to Position ». *Frontiers in Sports and Active Living* 4 (Avril) : 857373.

Glaise, P., Rogowski, I., Samozino, P., Morin, J-B., Morel, B et Martin, C. 2023. « Opposition Skill Efficiency During Professional Rugby Union Official Games Is Related to Horizontal Force-Production Capacities in Sprinting ». *International Journal of Sports Physiology and Performance* 18 (9): 918-26.

Glaise, P., Rogowski, I et Martin, C.2023. « Effects of repeated high-intensity effort training or repeated sprint training on repeated high intensity effort ability and in-game performance in professional rugby union player ». *Journal of Strength and Conditioning Research*. En révision.

Glaise, P., Morin, J-B., Morel, B et Martin, C. 2023. « Alteration of efforts performance during a repeated high-intensity effort bout in elite rugby union players ». En préparation.

Ces travaux ont également abouti à des communications lors de congrès et séminaires nationaux et internationaux :

Glaise, P., Morel, B., Rogowski, I., Cornu, B et Martin, C. 2022. « Influence of Repeated-Sprint Ability on the in-Game Activity Profiles of Semiprofessional Rugby Union Players According to Position ». *Association des Chercheurs en Activité Physique et Sportive (ACAPS)*. Montpellier, France, 2021.

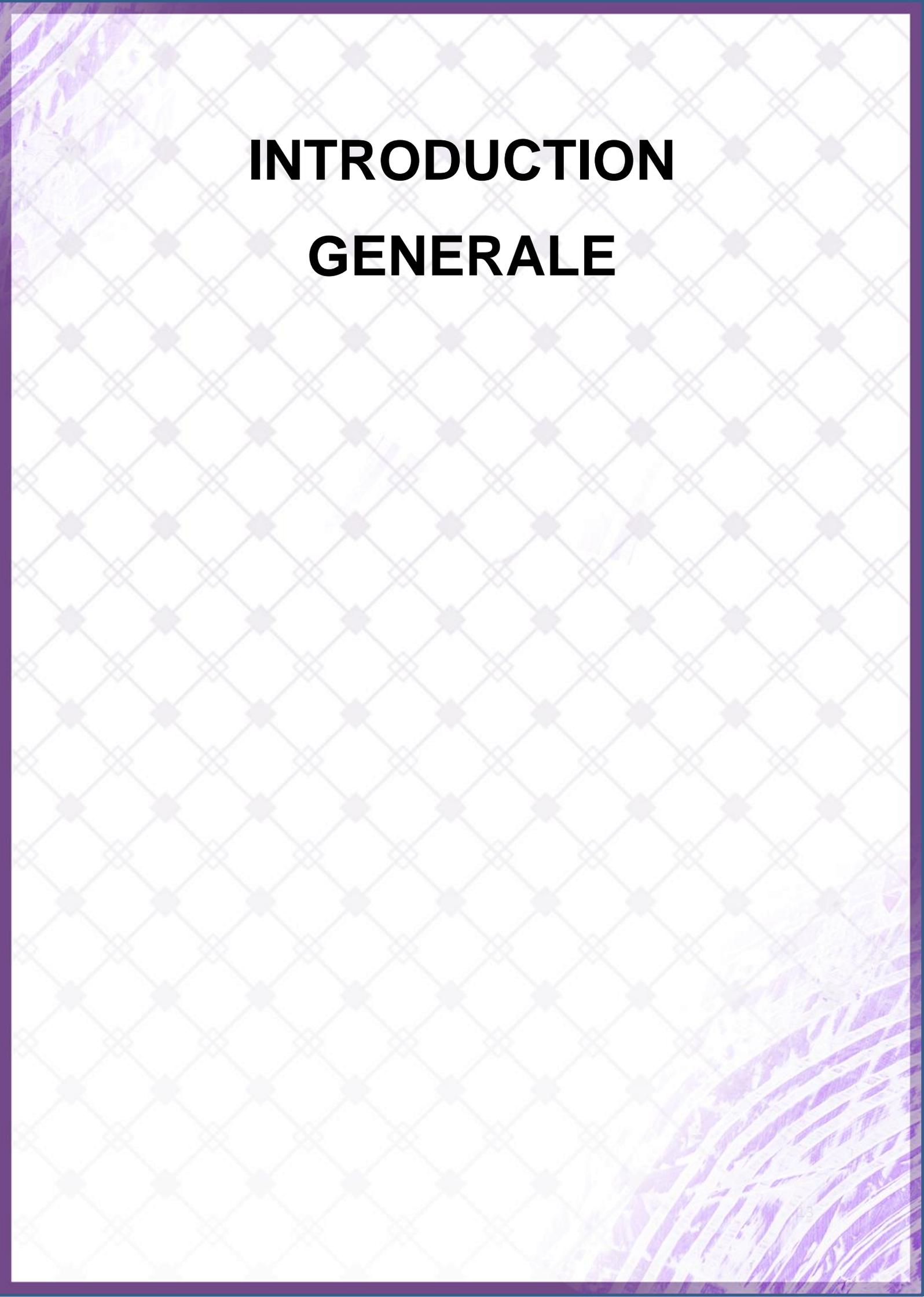
Glaise, P., Morel, B., Rogowski, I., Cornu, B et Martin, C. 2022. « Influence of Repeated-Sprint Ability on the in-Game Activity Profiles of Semiprofessional Rugby Union Players According to Position ». *26ème journée scientifique de l'Ecole Doctorale Interdisciplinaire Sciences Santé n° 205*. Lyon, France, 2021

Glaise, P., Rogowski, I., Samozino, P., Morin, J-B., Morel, B et Martin, C. 2023. « Opposition Skill Efficiency During Professional Rugby Union Official Games Is Related to Horizontal Force-Production Capacities in Sprinting ». *Conférence science et rugby de la Fédération Française de Rugby (FFR), Marcoussis, France, 2022.*

Glaise, P., Rogowski, I et Martin, C.2023. « Effects of repeated high-intensity effort training or repeated sprint training on repeated high intensity effort ability and in-game performance in professional rugby union player». *Congress of the European College of Sport Science (ECSS), Paris, France, 2023.*

Glaise, P., Rogowski, I et Martin, C.2023. « Effets de l'entraînement en RHIE VS entraînement en RSA sur la capacité à répéter des efforts de haute intensité et la performance en match ». *Global Rugby Leadership Conference (GRLC), Lyon, France, 2023.*

Glaise, P., Morin, J-B., Morel, B et Martin, C. 2023. « Altérations des performances au cours d'une séquence RHIE ». *Global Rugby Leadership Conference (GRLC), Lyon, France, 2023.*

The background of the slide features a repeating pattern of a diamond-shaped lattice with a small cross at each intersection. This pattern is overlaid on a light purple background. In the top-left and bottom-right corners, there are semi-transparent, high-magnification images of skeletal muscle tissue, showing the characteristic striated appearance of muscle fibers.

INTRODUCTION

GENERALE

Le rugby à XV est un sport collectif qui oppose deux équipes de quinze joueurs dans un jeu d'affrontement et d'évitement. La professionnalisation du rugby à XV à partir des années 1995 a eu pour incidence une augmentation du nombre de rencontres ainsi que de leur intensité. Le temps de jeu effectif et l'engagement athlétique des rugbymen n'ont cessé de croître lors de ces dernières décennies (Williams et al., 2005, Hugues et al., 2012). Pour répondre à ces demandes, les joueurs sont radicalement devenus plus lourds, plus puissants et davantage capables de répéter des séquences de jeu à très haute intensité (Quarrie et al., 2013), rendant la préparation physique indispensable pour protéger ces sportifs et optimiser leur performance et leur récupération au cours d'une saison.

Ces dernières années, la recherche en physiologie et biomécanique appliquée au rugby s'est amplement accélérée permettant, non seulement de mieux définir les exigences de l'activité et les facteurs de performance associés, mais aussi de mesurer l'efficacité des méthodes d'entraînement ou de récupération. Avec la professionnalisation, la préparation physique est passée d'une approche empirique à une approche scientifique. Cette dernière consiste à proposer des programmes d'entraînement individualisés en s'appuyant sur des méthodes et des éléments de la littérature scientifique récente, et en utilisant des outils technologiques de pointe. A titre d'exemple, les récepteurs GPS (Global Positioning System) sont aujourd'hui largement utilisés dans les clubs professionnels et permettent de déterminer les vitesses de déplacements, les distances parcourues ainsi que les accélérations produites par chaque joueur lors d'une séance d'entraînement ou d'un match. Ces données sont utilisées au quotidien par l'ensemble des membres du staff sportif pour optimiser les performances et la récupération de chaque athlète.

Le rugby à XV est une activité à forte contrainte mécanique qui requiert la production d'efforts explosifs réalisés à différents niveaux de force et de vitesse. Ces efforts explosifs incluent des situations de contact (Dubois et al., 2020, Cunniffe et al., 2009, Quarrie et Hopkins., 2007) et des phases de course, avec des accélérations maximales et des sprints (Cunniffe et al., 2009). Du fait des règles et du principe fondamental du jeu, les efforts en rugby sont majoritairement réalisés avec l'intention de progresser vers l'avant à une intensité maximale, en produisant des mouvements caractérisés par des niveaux de force et de vitesse différents selon les situations. Pour répondre à cette exigence, les joueurs organisent leur locomotion sur le plan

horizontal, ce qui génère des contraintes de force de réaction du sol orientées vers l'avant à différentes vitesses. Lors des sprints, la production de force horizontale sur le sol est considérée comme un indicateur important de la performance d'accélération (Rabita et al., 2015). Pour mesurer cette capacité, Samozino et al. (2016) ont proposé une méthode permettant d'analyser la relation force-vitesse horizontale lors d'un sprint afin d'établir un profil force/vitesse (FV) individuel (Samozino et al., 2016). Ce profil caractérise les capacités de l'athlète à produire une force horizontale nette sur un large spectre de vitesses de course, et permet de calculer des variables telles que la force maximale théorique (F_0), la vitesse maximale théorique (V_0), la puissance propulsive maximale (P_{max}), le rapport maximal entre la force horizontale et la force résultante sur un appui (RF_{max}) et le taux de diminution de ce rapport de forces avec l'augmentation de la vitesse (DRF). Ces variables sont déterminantes de la performance en sprint car elles renseignent sur l'efficacité mécanique de l'athlète dans l'application de la force dans la direction antéro-postérieure à faible vitesse et sa capacité à la maintenir à des niveaux élevés pendant la phase d'accélération lorsque la vitesse augmente.

Pendant un match de rugby, la capacité des joueurs à produire des courses à vitesse élevée (Duthie et al., 2005, Gabbett., 2012) et des changements de vitesse (*i.e.*, accélérations/décélérations) (Cunniffe et al., 2009, Quarrie et al., 2013) permet de créer des franchissements de la ligne défensive pour le porteur de balle (den Hollander et al., 2016) mais également à casser des plaquages (Gabbett et al., 2007). De plus, lors des efforts de contact, tels que les mauls, les mêlées ou les rucks, les athlètes poussent vers l'avant pour faire reculer leur adversaire ce qui nécessite une importante capacité à produire et à appliquer au sol une force horizontale plus élevée que pendant le sprint, associée à une vitesse plus faible. Quelle que soit la position du joueur, les capacités de production de force horizontale sont donc des indicateurs clés de la performance (key performance indicator : KPI) en rugby à XV. Or, les capacités de production de force horizontale évaluées lors d'un sprint linéaire n'ont jusqu'à présent été reliées qu'aux performances de sprint linéaire (Morin et Samozino., 2016, Lahti et al., 2020a, Lahti et al., 2020b). A ce jour, les liens possibles entre les caractéristiques du profil FV et les tâches spécifiques du rugby comme les efforts de contact demeurent inconnus.

Le rugby à XV est un sport à caractère intermittent dans lequel les joueurs sont amenés à produire et surtout répéter des efforts de haute intensité de différentes durées et natures (contacts et déplacements) entrecoupés par des phases de récupérations de durées aléatoires et souvent incomplètes (Deutsch et al., 2007, Gabbett., 2012). Ces efforts intenses consistent notamment en des sprints, des accélérations, des plaquages et des rucks, dont les proportions varient selon le poste du joueur (Austin et al., 2011a) et ce, quel que soit le niveau de compétition (Fornasier-Santos et al., 2020, Takamori et al., 2022). Dans ce contexte, les joueurs doivent développer des aptitudes physiologiques qui s'apparentent à la capacité à répéter des sprints (repeated-sprint ability ; RSa) qui est définie comme la capacité à réitérer des efforts brefs (*i.e.* < 10s) d'intensité maximale, entrecoupés de périodes de récupération courtes et incomplètes (généralement < 90 s) (Girard et al., 2011).

Dans les sports collectifs tels que le rugby à XV, la RSa est un facteur de performance fondamental (Bishop et al., 2011, Duthie et al., 2003). Un meilleur niveau de RSa est lié, en rugby à XIII, à une plus grande distance parcourue à haute vitesse (Gabbett et al., 2013), ainsi que, dans le rugby à XV, à un ratio d'activité plus élevé (*i.e.*, nombre d'actions par unité de temps) et au nombre de plaquages réussis chez les avants (Smart et al., 2014). À ce jour, seules ces deux études ont investigué la relation entre la RSa et la performance en compétition en rugby. La première étude a examiné la relation entre la RSa et la performance technique chez les avants et les arrières en rugby à XV, mais n'a pas analysé les relations entre RSa et performances physiques en match (Smart et al., 2014). La deuxième étude s'est concentrée sur les joueurs de rugby à XIII et a déterminé les relations entre le niveau de RSa et la performance physique en match, sans distinction des positions de jeu (Gabbett et al., 2013). Il reste cependant à déterminer si la RSa des joueurs, selon leurs postes de jeu, est liée à leurs performances en match.

Bien qu'en rugby à XV la RSa soit un facteur déterminant de la performance, elle ne prend pas en considération la réalisation des efforts de contacts qui sont centraux dans l'activité. Plusieurs auteurs ont ainsi proposé une évolution du concept de RSa : la capacité à répéter des efforts de haute intensité (repeated high intensity effort ability: RHIEa). D'abord proposée en rugby à XIII (Johnston et Gabbett., 2011), dans le rugby à XV (Austin et al., 2011b) puis dans le rugby à VII (Couderc et al., 2019), la RHIEa semble aujourd'hui plus pertinente que le RSa pour évaluer les aptitudes du joueur de

rugby à XV (Johnston et Gabbett., 2011). Une séquence de répétition d'efforts à haute intensité (RHIE) est définie comme une série d'au minimum trois efforts à haute intensité entrecoupés de moins de 21 s de récupération entre chacun d'eux (Austin et al., 2011b, Black et Gabbett., 2015). Les efforts de haute intensité comprennent les accélérations ($\geq 2,79 \text{ m.s}^{-2}$), les courses à haute intensité ($> 5,0 \text{ m.s}^{-1}$) ou les efforts de contact (tels que les plaquages, les rucks, les mauls et les mêlées) (Austin et al., 2011a, Austin et al., 2011b, Gabbett., 2012). En rugby à XV, l'occurrence et la nature des RHIE dépendent aussi du poste des joueurs. Les avants effectuent plus de RHIE que les arrières, avec des RHIE basés sur le contact, alors que les arrières produisent plus de RHIE basés sur la course (Austin et al., 2011b). Dans les sports d'équipe tels que le rugby, la capacité à réaliser des RHIE est considérée comme un élément déterminant de la performance (Hulin et al., 2015). En raison de leur nature différente, et parce que les efforts de contact génèrent une fatigue supplémentaire qui affecte fortement l'intensité de la course (Johnston, Gabbett et Jenkins., 2015, Johnston et al., 2016), la RSA et la RHIEa sont donc considérées comme deux qualités physiques distinctes (Johnston et Gabbett., 2011) et nécessitent donc des méthodologies d'entraînement spécifiques. Dans ce contexte, alors que les méthodes d'amélioration de la RSA ont été largement étudiées dans les sports collectifs (Bishop et al., 2011, Brocherie et al., 2017, Buchheit et al., 2010, Fornasier-Santos et al., 2018), la littérature scientifique actuelle est très limitée concernant les méthodes d'entraînement visant l'amélioration de la RHIEa. Par ailleurs, bien que les programmes d'entraînement utilisant des répétitions de sprint (RSA) ou des répétitions d'efforts à haute intensité (RHIE) génèrent des adaptations physiologiques spécifiques, il reste à déterminer si ces deux méthodes aboutissent, ou pas, à des évolutions similaires de RHIEa et des performances en match des rugbymen.

Bien que la RHIEa soit déterminante des performances en rugby à XV, la majorité des études publiées dans la littérature se sont concentrées sur les fondements physiologiques de cette qualité physique ainsi que sur l'occurrence des RHIE et leur impact sur les performances en match (Austin et al., 2011b, Johnston et Gabbett., 2011, Johnston, Gabbett et Jenkins., 2015, Sheehan et al., 2022, Gabbett., 2013). La répétition d'efforts à haute intensité au sein d'une séquence de RHIE s'accompagne d'une fatigue physiologique d'origines diverses, pouvant aboutir à une détérioration de la performance lors des derniers efforts. Morel et al. (2015) ont montré que la répétition

de mêlées entraînait une fatigue liée à des perturbations de l'activation musculaire, tandis que la fatigue se manifestant lors de répétitions de sprints était plutôt associée à une baisse de l'activité métabolique (Morel et al., 2015). Cependant, cette étude s'est uniquement concentrée sur des séquences de RHIE composées de répétitions d'un même effort, alors que les séquences de RHIE observées en match ne sont que rarement composées exclusivement du même type d'effort et que la composition de ces séquences peut différer selon le poste (Austin et al., 2011b, Sheehan et al., 2022). De plus, les efforts de contact (comme les mêlées et les mauls) influencent négativement les performances des courses qui suivent (Johnston, Gabbett et Jenkins., 2015, Johnston, Gabbett et Walker., 2015), sans pour autant que l'on sache si ces altérations ont une origine physiologique et/ou mécaniques. Les propriétés mécaniques d'un sprint peuvent être définies par la relation force-vitesse horizontale décrite précédemment, qui permet d'évaluer la capacité de l'athlète à produire une force propulsive horizontale pendant la course à différentes vitesses (Samozino et al., 2016, Morin et al., 2019). En rugby à VII, des évolutions du profil force-vitesse au cours d'un test de RSa ont été décrites (Jiménez-Reyes et al., 2019), avec en particulier des altérations de V_0 et DRF entre les premiers et les derniers sprints. On ne sait en revanche pas si ce type d'altération existe, ou est accentué dans le contexte des RHIE en rugby à XV.

Au regard de toutes les questions soulevées, l'objectif général de ce travail de thèse est d'identifier et de mieux caractériser les relations qui pourraient exister entre les capacités de production et de répétition des efforts de haute intensité, et des facteurs de performances au rugby à XV, notamment en situation écologique. Pour répondre à cet objectif général, après une synthèse de la littérature relative aux grands thèmes liés à la performance et à ses déterminants en rugby à XV, je présenterai mes travaux de recherche organisés en quatre sous-objectifs :

- Le premier objectif, qui fera l'objet de l'étude 1, sera de déterminer les relations entre les capacités de production de force horizontale en sprint et l'efficacité des joueurs dans les efforts de contact lors de matchs officiels de rugby à XV.

- Le second objectif visera à identifier les relations entre la RSa et la performance en match de rugby à XV en fonction des postes des joueurs, en considérant les indicateurs de performance clés propres à chaque poste. Il sera traité dans la seconde étude de cette thèse.

- Le troisième objectif consistera à déterminer si l'entraînement en répétition de sprint et l'entraînement en répétition d'efforts de haute intensité ont des effets différents sur la capacité à répéter des efforts de haute intensité et sur la production d'efforts de haute intensité en situation de match.

- Enfin, le dernier objectif, qui sera présenté dans l'étude 4, sera de caractériser l'évolution des efforts au cours d'une séquence RHIE.

REVUE DE LITTERATURE

1. Une histoire brève du rugby

Descendant de l'harpastum romain, le rugby à quinze est officiellement né en 1823 en Angleterre dans la ville de Rugby, où, selon la légende, William Webb Ellis prit la balle à la main et la porta en avant, contournant ainsi les règles du football. A partir de cette date, la pratique du rugby s'étend dans le Royaume Uni et en France et reste un sport amateur jusqu'en 1995. Depuis lors, le rugby est devenu un sport professionnel de premier plan et a connu une croissance exponentielle à travers le monde. Le rugby à XV est joué dans plus de 120 pays et est considéré comme l'un des sports les plus physiques et exigeants sur le plan athlétique. Depuis sa professionnalisation, le jeu a connu des évolutions majeures (Quarrie et al., 2007) avec des règles modifiées répondant à la volonté de rendre le jeu plus rapide et plus spectaculaire. Il en résulte une augmentation du temps de jeu effectif (Cazorla et al., 2004), qui accroît les sollicitations athlétiques du rugby à XV. Ces changements ont eu des répercussions sur la préparation physique des joueurs qui s'est largement développée, avec une attention accrue portée à la force, la vitesse (et donc la puissance), et l'endurance (Smart et al., 2013, Jones et al., 2016). Les joueurs de rugby ont désormais des profils physiques plus complets et sont capables de produire et répéter des efforts de haute intensité tout au long du match conduisant à une plus grande intensité physique ainsi qu'une augmentation de la vitesse de jeu. Dans ce contexte, la recherche scientifique a un rôle important à jouer pour aider les équipes à optimiser leur préparation physique et à réduire le risque de blessures. Les études sur la performance et la préparation physique des joueurs de rugby à XV sont donc de plus en plus nombreuses, visant à mieux comprendre les exigences physiques du jeu et à développer des stratégies d'entraînement plus efficaces.

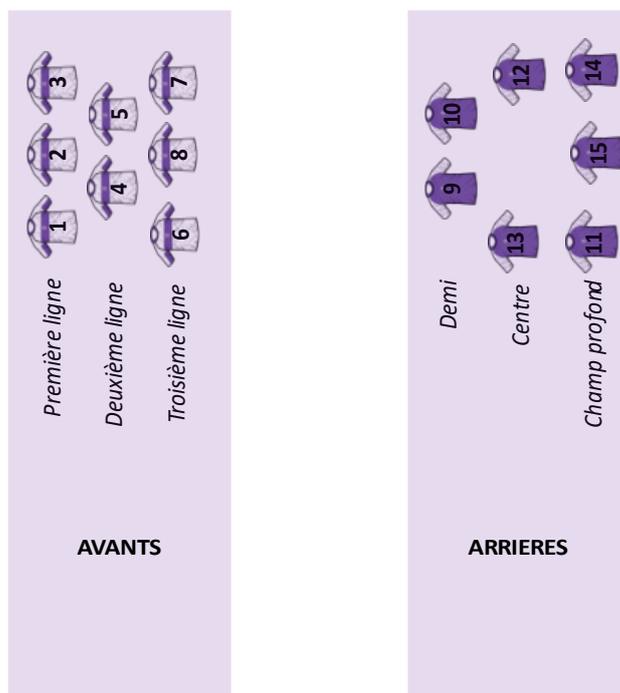
2. Description de l'activité de rugby à XV

2.1. Généralités du jeu et principes fondamentaux

Le rugby à XV oppose deux équipes de quinze joueurs qui s'affrontent lors d'un match de 80 minutes découpé en deux périodes de 40 minutes séparées par une mi-temps de 15 minutes maximum. Les joueurs évoluent sur un terrain mesurant entre 94 et 100m de longueur et entre 68 et 70m de large (International Rugby Board., 2023). L'objectif général du jeu est de progresser en direction du camp adverse pour marquer des points. Pour cela, un grand nombre de règles sont à respecter notamment en effectuant obligatoirement des passes vers l'arrière pour se transmettre le ballon. L'un des principes fondamentaux de ce jeu est donc d'avancer individuellement et/ou collectivement pour marquer. Un essai vaut 5 points, auxquels peuvent se rajouter 2 points en cas de transformation réussie (excepté dans le cas d'un essai de pénalité où 7 points sont attribués d'office). Une pénalité ou un drop réussi permet de marquer 3 points.

Au sein de chaque équipe, chaque joueur possède un poste spécifique ainsi qu'un numéro en accord avec ce dernier. Une équipe de rugby peut être divisée en deux groupes appelés « lignes » avec d'un côté les avants, qui concernent les 8 premiers postes : pilier gauche (1), talonneur (2), pilier droit (3), deuxièmes lignes (4 et 5) et troisièmes lignes (6,7 et 8). De l'autre côté, les arrières occupent les 7 postes restants : demi de mêlée (9), demi d'ouverture (10), ailiers (11 et 14), centres (12 et 13) et arrière (15).

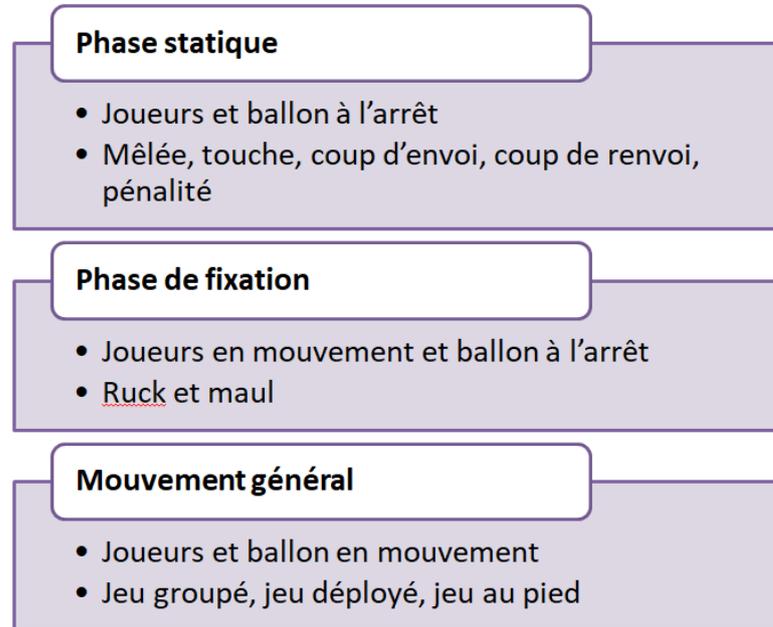
Figure 1. Représentation des différents postes en rugby à XV



2.2. Phases de jeu

Lors d'un match, chaque équipe alterne entre un statut d'utilisateur (en possession du ballon, situation offensive) ou d'opposant (sans possession du ballon, situation défensive). En utilisation, l'objectif est de faire avancer le ballon vers le camp adverse (par la main ou le pied) pour marquer alors qu'en opposition, le but est d'empêcher l'avancée adverse et de récupérer le ballon. On observe trois phases de jeu distinctes dans lesquelles chaque équipe peut avoir un statut d'utilisateur ou d'opposant. La première phase est la phase statique ou ordonnée, qui correspond au lancement du jeu où les joueurs et le ballon sont à l'arrêt. Cette phase inclut les situations telles que la mêlée, la touche, le coup d'envoi, le coup de renvoi et la pénalité. La deuxième phase est la phase de fixation, où le ballon n'avance pas mais les joueurs sont en mouvement. Cette phase concerne les situations de ruck et de maul. Enfin, la troisième phase est le mouvement général, où le ballon et les joueurs sont en mouvement. Cette phase se produit lors du jeu groupé, du jeu déployé et du jeu au pied.

Figure 2. Phases de jeu en rugby à XV



3. Exigences physiques du rugby à XV

3.1. Méthodes d'évaluation de l'activité des joueurs en match

Avec la professionnalisation du rugby à XV, les exigences mécaniques et physiologiques appliquées ou produites par les joueurs en compétition ont été de mieux en mieux décrites et analysées. Ces analyses s'appuient sur le recueil de données objectives, obtenues grâce à différents outils (récepteur GPS, cardiofréquencemètre, analyse vidéographique) qui permettent de mesurer la charge externe des joueurs.

3.1.1. Centrales d'analyse cinématique (« GPS »)

3.1.1.1. Fonctionnement général

En sport, bien que le mot « GPS » soit communément employé pour décrire ces récepteurs, les outils utilisés sont en réalité des centrales d'analyse cinématique (CAC), composées, d'une part d'un récepteur GPS avec une fréquence d'échantillonnage allant de 1 à 16 HZ permettant de mesurer les macro mouvements, et d'autre part d'une centrale inertielle contenant un accéléromètre 3D, un magnétomètre 3D de 100HZ et un gyroscope 3D d'une résolution de $1200 \text{ }^\circ.\text{s}^{-1}$ qui mesurent les micromouvements.

Historiquement créé et utilisé à des fins civiles et militaires, le système GPS (Global Positioning System) est maintenant largement utilisé dans le sport de haut niveau pour quantifier les mouvements des athlètes. Ce système utilise un groupe de satellites en orbite autour de la terre qui émettent un signal en continu vers le récepteur GPS qui mesure la distance le séparant des satellites (par un calcul de durée de propagation du signal). Parmi eux, 4 satellites au minimum sont nécessaires (3 pour les dimensions x, y, z et 1 pour le temps) pour déterminer trigonométriquement la position du récepteur GPS. La vitesse de déplacement, est quant à elle calculée par effet doppler en considérant le différentiel de fréquence d'onde d'émission et de réception (Larsson., 2003).

L'accéléromètre mesure les accélérations linéaires sur les axes x, y et z et représente les variations de vitesse en fonction du temps exprimées en $\text{m}.\text{s}^{-2}$. Le magnétomètre 3D détermine la direction des mouvements grâce à l'intensité et à la direction du champ magnétique. Enfin, le gyroscope 3D définit l'orientation du corps du joueur grâce à la mesure de la position angulaire de son référentiel par rapport à un référentiel inertiel.

La précision et la fiabilité de cet outil technologique peut être cependant limitée par la fréquence d'échantillonnage. En effet, les appareils GPS à 10 Hz sont jusqu'à six fois plus fiables pour mesurer la vitesse instantanée que les appareils à 5 Hz et ont une sensibilité suffisante pour mesurer les performances en sport collectifs (Varley et al., 2012). De plus, les infrastructures d'entraînement ou de compétition (toiture du stade,

urbanisation) peuvent occulter les signaux satellites et fausser les mesures (Larsson., 2003).

A l'entraînement ou en compétition, ces centrales d'analyse cinématique sont portées par les joueurs entre les deux scapulas, à l'aide d'une poche dans le maillot ou bien grâce à une brassière spécifique. Elles permettent aux staffs sportifs de mesurer l'ensemble des mouvements des joueurs et ainsi de quantifier les charges d'entraînement et les performances en match. Ce recueil de données participe à l'amélioration des connaissances et de la compréhension des exigences de l'activité de rugby à XV.

Table 1. Caractéristiques techniques de la CAC utilisée pour la thèse

Dimensions	81 mm x 43 mm x 16 mm
Poids	53 g
Positionnement global	GPS 10 HZ, GLONASS & SBAS
Accéléromètre	3D \pm 16G. Échantillonné à 1kHz, fourni à 100Hz
Gyroscope	3D 2000 °/s à 100 Hz
Magnétomètre	3D \pm 4900 T à 100 Hz

3.1.1.2. Les variables mesurées par la CAC

3.1.1.2.1. *Distance parcourue*

La distance parcourue par un joueur est un indicateur très couramment utilisé par les staffs sportifs pour quantifier la charge d'entraînement ainsi que la performance réalisée en match ou à l'entraînement (Cummins et al., 2013). Elle est calculée par le récepteur GPS qui considère les changements de position du joueur en fonction du temps et détermine ainsi la distance parcourue. Cette variable peut s'exprimer en valeur absolue et représente la distance totale parcourue par un joueur (exprimée en mètres ou kilomètres) ; elle peut également être exprimée en valeur relative par rapport au temps de jeu de chaque joueur et représente ainsi une vitesse moyenne (exclusivement exprimée en mètres par minute : $m \cdot min^{-1}$). La distance absolue est intéressante pour quantifier un volume de travail du joueur alors que la distance relative permet de mesurer l'intensité de déplacement moyenne sur une période de temps définie (match complet, mi-temps, temps de jeu effectif, etc...) et de pouvoir comparer les performances des joueurs indépendamment du temps de jeu de chacun (Cummins et al., 2013).

3.1.1.2.2. *Vitesse de déplacement*

La vitesse de déplacement est définie comme le rapport de la distance parcourue sur le temps écoulé. Principalement exprimée en mètres par seconde ($m.s^{-1}$) ou en kilomètres par heure ($km.h^{-1}$), elle représente une intensité de déplacement. Dans un sport collectif comme le rugby à XV, la vitesse des joueurs est obtenue grâce aux centrales d'analyse cinématique et permet de déterminer la vitesse maximale atteinte par chaque joueur (Cahill et al., 2013) ou la quantité d'efforts, c'est-à-dire le nombre de courses ou la distance parcourue par chaque joueur selon des zones de vitesses absolues et relatives allant de la marche jusqu'au sprint (Cummins et al., 2013). Les zones de vitesses absolues permettent d'évaluer la performance des joueurs selon des zones d'intensité standardisées pour l'ensemble des joueurs ; malheureusement, ces zones d'intensité ne sont pas toujours les mêmes selon les études (voir Table 2) (Pollard et al., 2018, Beard et al., 2019, Cunningham et al., 2016). De façon complémentaire, les zones de vitesses relatives à une vitesse de référence (traditionnellement la vitesse maximale du joueur) permettent de comparer la performance des joueurs indépendamment de leur vitesse maximale (Cahill et al., 2013, Reardon et al., 2017a). Toutefois, l'utilisation de zones absolues ou relatives peut influencer la quantité de travail à haute intensité mesurée d'où l'intérêt d'utiliser les deux méthodes de classification (Gabbett., 2015b).

Table 2. Seuils de vitesse absolus et relatifs utilisés en rugby à XV.

Références	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5		Zone 6	
	Vitesse	Description	Vitesse	Description	Vitesse	Description	Vitesse	Description	Vitesse	Description	Vitesse	Description
Zones absolues												
Cunniffe et al., 2009	0–6.0 km.h ⁻¹	Standing, walking	6.0– 12.0 km.h ⁻¹	Jogging	12.0– 14.0 km.h ⁻¹	Cruising	14.0– 18.0 km.h ⁻¹	Striding	18.0- 20.0 km.h ⁻¹	High intensity running		
Suarez arrones et al., 2012	0.1– 5.9 km.h ⁻¹	Standing, walking	6.0– 11.9 km.h ⁻¹	Jogging	12.0– 13.9 km.h ⁻¹	Cruising	14.0– 17.9 km.h ⁻¹	Striding	18.0– 19.9 km.h ⁻¹	High intensity running	>20 km.h ⁻¹	Sprint
Higham et al., 2012	0-7.2 km.h ⁻¹	ND	7.2- 12.6 km.h ⁻¹	ND	12.6- 18.0 km.h ⁻¹	ND	18.0- 21.6 km.h ⁻¹	ND	>21.6 km.h ⁻¹	ND		
Hartwig et al., 2011	0-1.0 km.h ⁻¹	Standing	1.0-7.0 km.h ⁻¹	Walking	7.0- 12.0 km.h ⁻¹	Jogging	12.0- 21.0 km.h ⁻¹	striding	>21.0 km.h ⁻¹	Sprint		
Jones et al., 2015	0-1.6 m.s ⁻¹	Walking	1.6-2.7 m.s ⁻¹	Jogging	2.7-3.8 m.s ⁻¹	Cruising	3.8-5.0 m.s ⁻¹	Striding	5.0-5.5 m.s ⁻¹	Hihg intensity running	>5.6 m.s ⁻¹	Sprint
Quarrie et al., 2013	0-2 m.s ⁻¹	ND	2-4 m.s ⁻¹	ND	4-6 m.s ⁻¹	ND	6-8 m.s ⁻¹	ND	>8 m.s ⁻¹	ND		
Zones relatives												
Cahill et al., 2013	0-1.0 km.h ⁻¹	Standing	<20% Vmax	Walking	20- 50% Vmax	Jogging	51- 80% Vmax	Striding	81- 95% Vmax	Sprinting	96- 100% Vmax	Maximum sprint
Venter et al., 2011	0-1.0 km.h ⁻¹	Standing	<20% Vmax	Walking	20- 50% Vmax	Jogging	51- 80% Vmax	Striding	81- 95% Vmax	Sprinting	96- 100% Vmax	Maximum sprint

ND : Non disponible

3.1.1.2.3. Accélérations et décélération

L'accélération correspond aux modifications de la vitesse de déplacement en fonction du temps. Elle est caractérisée par une intensité (norme du vecteur) et par une direction, et elle est calculée grâce à la dérivée du vecteur vitesse au cours du temps. En sport collectif, on observe des accélérations principalement lorsque (i) la vitesse de l'athlète augmente au cours du temps ; accélération positive, (ii) la vitesse de l'athlète diminue au cours du temps ; accélération négative (*i.e.*, décélération), (iii) la direction du mouvement de l'athlète est modifiée ; changement de direction. De façon similaire à la classification des vitesses en zones, la mesure des accélérations est souvent décomposée en plusieurs zones d'intensités allant de 1.5 m.s⁻² à 4 m.s⁻² (Cunniffe et al., 2009, Pollard et al., 2018, Buchheit et al., 2014). Parmi ces zones, les accélérations >2.79 m.s⁻² sont généralement considérées comme des efforts de haute intensité (Austin et al., 2011a, Jones et al., 2015), qui génèrent de la fatigue neuromusculaire (Marqués-Jiménez et al., 2022). Le nombre d'accélérations/décélérations, et les distances parcourues en situation de forte accélération ou décélération sont couramment utilisés en rugby à XV (Jones et al., 2015).

3.1.1.2.4. Quantité de travail

La plupart des centrales d'analyse cinématique fournissent une évaluation de la quantité totale de travail produit par le joueur. Ces évaluations combinent les variables issues des efforts de course (mesurés par le récepteur GPS) et des efforts non courus (*i.e.*, sauts, micro-mouvements, efforts de contact mesurés par les accéléromètres). Par exemple, la société Catapult, qui commercialise les centrales utilisées dans le cadre de cette thèse, propose la variable Playerload qui prend en considération les changements instantanés d'accélération dans chacun des trois axes au cours du temps (Boyd et al., 2011), ce qui permet d'additionner tous les efforts produits par le joueur au cours de la période étudiée et d'obtenir *in fine*, un score (en unité arbitraire) représentant la quantité de travail totale réalisée par le joueur.

$$\text{PlayerLoad}^m = \sqrt{\frac{(a_{y(t)} - a_{y(t-1)})^2 + (a_{x(t)} - a_{x(t-1)})^2 + (a_{z(t)} - a_{z(t-1)})^2}{100}}$$

Où $a(y)$ est l'accélération horizontale, $a(x)$ l'accélération latérale et $a(z)$ l'accélération verticale.

Malgré des différences d'interprétation (Bredt et al., 2020) et de sensibilité en fonction de la CAC utilisée, la Playerload est considérée comme une mesure fiable (Boyd et al., 2011). Certaines sous-composantes de cette variable sont également utilisées comme la Playerload « slow » qui représente l'ensemble des efforts réalisés pour une vitesse inférieure à 2 m.s^{-1} ou encore la Playerload 2D qui exclue les accélérations verticales (réalisées pendant la course). Ces deux paramètres permettent de déterminer les micros mouvements ainsi que l'activité non courue, ce qui permet d'estimer la charge combattue des joueurs (Read et al., 2018, Gabbett., 2015a). En rugby à XV, la Playerload slow a été considérée comme la mesure la plus utile pour évaluer l'activité liée aux contacts chez les avants comme chez les arrières pendant les matchs (Roe et al., 2016).

3.1.1.2.5. *Impacts*

La mesure du nombre d'impacts reçus par le joueur permet d'estimer la production d'efforts de contact, qui touchent l'ensemble des joueurs et en particulier les avants (Coughlan et al., 2011). L'accéléromètre enregistre les accélérations du joueur et rapporte les situations dans lesquelles l'accélération (ou plus souvent la décélération) est très élevée ; dans ce cas, ces accélérations sont exprimées en « g » (*i.e.*, $1 \text{ g} = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$). Ces variations de vitesse intenses sont répertoriées comme des impacts, et sont généralement classées par tranche d'intensité allant de l'impact léger ($<5.0 \text{ g}$) à l'impact sévère ($>10.1 \text{ g}$) (Cunniffe et al., 2009). La quantification de ce type de sollicitations est très importante car le nombre de contacts réalisés par une équipe serait associée à la performance en rugby à XIII (Hulin et al., 2015) mais également en rugby à XV (Dubois et al., 2020). L'utilisation des micro-technologies pour quantifier le nombre d'impacts est considérée comme fiable et permet de contrôler l'augmentation de la fatigue neuromusculaire et du risque de blessure lié aux efforts de contact (Hulin et al., 2017).

3.1.2. L'analyse vidéographique

L'analyse vidéographique est utilisée dans les sports collectifs tels que le rugby à XV dans l'objectif de quantifier les mouvements et les évènements spécifiques réalisés par une équipe ou par un joueur. Aujourd'hui, bien que les récepteurs GPS soient prioritairement utilisés pour quantifier l'activité des joueurs, l'analyse vidéographique reste fondamentale et indispensable pour caractériser les évènements d'un match de rugby à XV. De nos jours, chaque staff sportif est pourvu d'un analyste vidéo dont le rôle est de séquencer les matchs en recensant l'ensemble des activités spécifiques réalisées. Ainsi, chaque évènement (passe, jeu au pied, ruck, essai...) est quantifié, puis attribué au joueur qui a réalisé l'évènement. De plus, l'analyste peut également rajouter d'autres éléments de classification comme l'efficacité d'une activité ou encore l'endroit du terrain où l'évènement a eu lieu. Ces informations sont fondamentales pour les staffs sportifs pour déterminer des indicateurs collectifs de performance (Jones et al., 2004) et ainsi proposer des contenus d'entraînements adaptés.

3.2. Caractérisation générale des exigences physiologiques et mécaniques en rugby à XV

Le rugby à XV est un sport intermittent composé d'efforts de haute intensité courus et combattus entrecoupés par des périodes de récupérations de durée et de nature aléatoires et incomplètes (Deutsch et al., 2007, Morel et al., 2015). Dans ce contexte, les joueurs de rugby sont soumis à d'importantes contraintes mécaniques qui génèrent des réponses physiologiques variées et des dommages musculaires importants (Marqués-Jiménez et al., 2022).

3.2.1. Temps de jeu

Le temps de jeu des joueurs est une variable importante dans le suivi et l'analyse de la performance en rugby à XV. La quantification du temps de jeu des joueurs peut se calculer en valeur absolue (temps de jeu total incluant les phases de récupération) ou

bien en temps de jeu effectif, nommé « ball in play » (BIP) dans la littérature, qui ne comptabilise le temps de jeu que lorsque le ballon est en mouvement (excluant ainsi les périodes de récupération). Ces deux paramètres conduisent à des données très différentes et permettent une analyse plus étoffée de la performance. D'autre part, la forme de temps de jeu choisie va influencer fortement l'interprétation des autres données récoltées. Les données GPS calculées sur un match complet sont significativement inférieures à celles obtenues en temps de jeu effectif (Pollard et al., 2018, Quarrie et al., 2013). D'autre part, le temps de jeu diffère selon le poste de jeu occupé, les joueurs du cinq de devant (78 ± 12 min) et les demis de mêlées (70 ± 06 min) auraient un temps de jeu significativement inférieur aux troisièmes lignes et au reste des arrières (tous $>$ à 87 ± 12 min) (Jones et al., 2015).

La comparaison des performances des joueurs n'ayant pas joué le même temps de jeu reste délicate. Il est établi que l'intensité décroît lors de la seconde mi-temps comparée à celle de la première (Higham et al., 2012) et en particulier dans les 20 dernières minutes d'un match, indépendamment du poste de jeu (Fornasier-Santos et al., 2021). L'intensité mesurée serait également supérieure chez les avants remplaçants comparés aux avants titulaires ayant joué le match entier concernant notamment la distance parcourue à haute intensité (17 ± 9 vs 10 ± 4 m.min⁻¹ respectivement) (Tee et al., 2020).

3.2.2. Ratio d'effort/Ratio d'activité

Le ratio d'effort est défini comme un rapport de durée entre la durée d'effort (i.e., comptabilisée lorsque le joueur est en mouvement ou en activité statique) et la durée de récupération. Il est calculé en divisant le temps d'effort par le temps de récupération (i.e., ratio E:R). Il diffère du ratio d'activité qui représente l'ensemble des actions produites par un joueur et se calcule comme la somme de toutes les actions effectuées par le joueur, divisée par le temps de jeu total du joueur (Smart et al., 2014).

Ces deux ratios renseignent sur l'intensité moyenne produite par les joueurs. D'après Lacome et al. (2014), les avants enregistrent un ratio E:R significativement supérieur aux arrières (1:6.5 vs. 1:8.5, respectivement), ce qui montre que les avants ont une plus grande fréquence d'activité, des périodes d'effort plus longues et des périodes de récupération plus courtes que les arrières (Deutsch et al., 2007, Roberts et al., 2008).

Toutefois, Smart et al. (2014) observent que le ratio d'activité est de 1.24 ± 0.46 chez les avants et de 1.48 ± 0.90 chez les arrières. De plus, dans un match de rugby à XV, il semblerait que les joueurs soient exposés à des ratios variables répartis en différentes proportions. Dans une étude proposant une analyse de l'activité chez 30 joueurs internationaux français lors de 5 rencontres internationales, il a été rapporté que les ratios $E : R < 1 : 4$ représentaient 50.3 ± 5.9 % du nombre total de ratios chez les avants et 53.8 ± 7.7 % chez les arrières. Ce qui montre que la majorité des ratios d'effort sont très en faveur de la récupération quel que soit le poste de jeu. De plus, la distribution des ratios semble varier en fonction du type d'activité (statique, moyenne intensité et $> VMA$) et en fonction des postes (Lacome et al., 2014). Toutefois, bien que le ratio moyen d'effort soit très en faveur de la récupération, l'analyse de cet indicateur ne permet pas de définir les exigences physiologiques du jeu avec précision en raison du caractère très variable des périodes d'activité et de récupération lors d'un match de rugby à XV.

Certaines périodes du jeu peuvent alors accroître spontanément la fatigue des joueurs et devenir critique pour la performance comme par exemple après une phase de « worst case scenario » (Cunningham et al., 2018, Reardon et al., 2017a).

3.2.3. Caractéristiques de déplacement

Durant un match de rugby à XV, les caractéristiques de déplacement des joueurs diffèrent en fonction du poste de jeu. Sur un match entier, les avants parcourent en moyenne une distance totale de 6680m alors que les arrières parcourent 7227m (Cunniffe et al., 2009). Lorsqu'on considère l'ensemble des postes chez les avants, on observe que les piliers et les deuxièmes lignes parcourent significativement moins de distance que les talonneurs et les troisièmes lignes ; chez les arrières, les demis (de mêlée et d'ouverture) ainsi que le premier centre sont ceux qui parcourent les plus grandes distances (Cahill et al., 2013). Des résultats similaires sont observés par (Quarrie et al., 2013), qui rapportent que les demis de mêlée et les arrières accomplissent la distance totale la plus élevée (respectivement 6200 ± 360 m et 6300 ± 300 m). Toutefois, la distance totale parcourue n'est qu'un indicateur de volume de déplacement qui ne renseigne pas sur l'intensité à laquelle cette distance est réalisée. Pour cette raison, les praticiens utilisent également la distance relative. La distance

relative est en réalité une vitesse moyenne, souvent exprimée en mètre par minute (*i.e.*, $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) et représente l'intensité moyenne de déplacement d'un athlète. Les avants se déplacent à une intensité médiane 10.1% inférieure à celle des arrières dans un match complet ($64.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ vs $71.1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ respectivement pour les avants et les arrières) (Cahill et al., 2013). Lorsqu'ils considèrent l'ensemble des postes, les mêmes auteurs observent que la première ligne se déplace avec une intensité plus faible ($62.3 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$). A l'inverse, le demi de mêlée est le joueur dont l'intensité médiane est la plus élevée de l'équipe ($78.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$). Ces résultats sont confirmés plus récemment par (Pollard et al., 2018), qui montrent également des différences similaires avec des valeurs plus élevées lorsqu'on mesure la distance relative en temps de jeu effectif (106.0 ± 5.6 vs $111.4 \pm 10.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ pour les avants et les arrières respectivement). De plus, l'intensité moyenne de déplacement semble être influencée par le niveau de compétition (Cunningham et al., 2016). En ce sens, (Fornasier-Santos et al., 2020) ont montré que la distance relative produite en Top 14 ($59.0 \pm 9.0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$) était significativement inférieure à l'intensité en European rugby champions cup ($64.7 \pm 9.7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$).

3.2.4. Courses à intensité sous maximale

L'objectivation des caractéristiques de déplacement des joueurs peut se réaliser en étudiant les différentes zones d'intensités délimitées par des vitesses seuils (absolues ou relatives). Bien qu'il existe un grand nombre de seuils utilisés par les chercheurs, (Cummins et al., 2013) ont synthétisé la littérature et montré que les déplacements étaient généralement classés en cinq à six zones de vitesse allant de 0 à $36 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (Table 2). Les auteurs qui utilisent une classification en zones absolues montrent que les avants parcourent significativement moins de distance entre 0 et $7.2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (entre 820 et 860m) que les arrières (entre 800 et 1100m) (Quarrie et al., 2013). Alors qu'aucune différence de distance parcourue n'est observée entre les avants et les arrières entre 6.12 et $12.96 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ($2024 \pm 400 \text{ m}$ vs $2010 \pm 340 \text{ m}$ respectivement) et entre 12.96 et $18 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ($812 \pm 214 \text{ m}$ vs $815 \pm 215 \text{ m}$ respectivement). Les arrières parcourent de plus grandes distances entre 18 et $24.12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ que les avants ($448 \pm 149 \text{ m}$ vs $298 \pm 107 \text{ m}$ respectivement) (Roberts et al., 2008). Cela représente respectivement 7.5% et 5.6% de la distance totale parcourue (Coughlan et al., 2011). Toutefois, les valeurs obtenues en utilisant des zones absolues peuvent être sous-

estimées ou surestimées en fonction des caractéristiques différentes des athlètes (par exemple la vitesse maximale) et biaiser les comparaisons entre les joueurs. Pour cette raison, certains auteurs ont proposé une classification relative à la vitesse maximale des sujets (voir tableau 2) (Venter et al., 2011, Cahill et al., 2013). En utilisant cette classification on s'aperçoit que les arrières parcourent un plus grand pourcentage de leur distance totale dans des intensités inférieures à 20% de la vitesse maximale (46.3 % vs 37.3% de la distance totale chez les arrières et les avants respectivement), alors que les avants possèdent une plus grande proportion de la distance totale parcourue entre 20 et 50% de la vitesse maximale (46.2% vs 39.7% pour les avants et les arrières respectivement) ainsi qu'entre 51 et 80% de la vitesse maximale (15.6 % vs 12.5% pour les avants et les arrières respectivement)(Cahill et al., 2013).

3.2.5. Courses d'intensité maximale (sprint)

En rugby à XV, les qualités de vitesse jouent un rôle important dans la performance (Cunniffe et al., 2009). Toutefois, le nombre et la durée des sprints diffèrent selon le poste du joueur. En effet Duthie et al. (2006) ont rapporté que les avants réalisaient en moyenne 13 ± 6 sprints par match qui duraient en moyenne 2.5 ± 1.6 s alors que les arrières achevaient 24 ± 7 sprints par match d'une durée moyenne de 3.1 ± 1.6 s. Ces résultats étaient confirmés plus tard par (Cunningham et al., 2016)(D. Cunningham et al. 2016) avec en moyenne 11.1 ± 5.0 sprints contre 26.4 ± 7.5 chez les arrières. Cela représente une distance sprintée inférieure chez les avants (14.7 ± 2.5 m) comparée aux arrières (19.5 ± 3.9 m) (Suarez-Arrones et al., 2012). Alors qu'aucune différence significative n'était observée entre les deux groupes pour les distances parcourues entre 81 et 95% de V_{max} et entre 96% et 100% de V_{max} (Venter et al., 2011, Cahill et al., 2013) ce qui diffère fondamentalement des analyses proposées avec des zones absolues.

Les vitesses maximales atteintes par les avants sont également inférieures à celles atteintes par les arrières (Cahill et al., 2013) avec 24.6 ± 1.5 km.h⁻¹ contre 28.2 ± 2.5 km.h⁻¹ respectivement (Suarez-Arrones et al., 2012). De plus, la nature des sprints peut être également influencée par le poste occupé. Chez les avants, 41% des sprints sont réalisés à partir d'un départ arrêté, 59% des sprints sont accomplis avec une vitesse de départ non nulle (21% avec une vitesse <20% de V_{max} , 32% avec une

vitesse entre 20% et 50% de V_{max} et 6% avec une vitesse entre 50% et 80% de la V_{max}). En revanche, chez les arrières, seulement 29% des sprints sont réalisés avec un départ arrêté alors que 71% des sprints sont accomplis avec une vitesse de départ non nulle (28% avec une vitesse $<20\%$ de V_{max} , 29% avec une vitesse entre 20% et 50% de V_{max} et 14% avec une vitesse entre 50% et 80% de la V_{max}) (Duthie et al., 2006). Par ailleurs, le pourcentage des sprints réalisés avec au moins un changement de direction varie de 15% chez les avants à 22% chez les arrières, ce qui montre que les qualités de vitesse non linéaire sont également très importantes pour la performance en rugby à XV (Duthie et al., 2006). Enfin, il a été rapporté que la distance parcourue à des vitesses supérieures à 81% de V_{max} représentait uniquement 0.7 % de la distance totale parcourue lors d'un match, chez les avants comme chez les arrières (Cahill et al., 2013). Ces données viennent confirmer les résultats rapportés précédemment qui montraient que la distance parcourue au-dessus de 24.12 km.h^{-1} ne représentait que 0.3% de la distance totale chez les avants, et 1.6% de la distance totale parcourue par les arrières (Coughlan et al., 2011) ce qui montre que le rugby à XV est davantage un sport d'accélération que de vitesse maximale (V_{max}).

L'utilisation de différents seuils de vitesses entre les études rend difficile l'analyse de l'influence des sprints sur la performance en match. Il semble qu'il n'y ait pas de différence concernant le nombre de sprints entre les équipes gagnantes et les équipes perdantes (Dubois et al., 2020). Plus précisément, dans les équipes gagnantes, les avants et les arrières produisent respectivement 0.5 ± 1.1 et 4.1 ± 3.2 sprints alors que dans les équipes perdantes, ils réalisent respectivement 0.4 ± 0.8 et 4.9 ± 3.1 sprints. A l'inverse, des corrélations triviales à modérées ont été observées entre la performance au sprint (temps au 20m de sprint pour les avants et temps au 30m de sprint pour les arrières) et des indicateurs clés de la performance (Smart et al., 2014). Ainsi, le temps au sprint de 20m était inversement corrélé à la distance parcourue balle en main ($r = -0.32$; corrélation modérée), au nombre d'essai marqué ($r = -0.17$; corrélation triviale) et au nombre de duels remportés balle en main ($r = -0.39$; corrélation modérée). Chez les arrières, le temps au 30m était similairement corrélé aux mêmes KPI de façon triviale (-0.13 , -0.16 , et -0.25 pour la distance balle en main, le nombre d'essais marqués et le nombre de duels remportés respectivement).

3.2.6. Accélération et décélération

Le rugby à XV est un sport d'affrontement et d'évitement qui conduit à de nombreuses variations de vitesses et changements de direction. Les travaux conduits par (Duthie et al., 2005) montrent que chez les avants, seulement 42% des sprints engagés permettent d'atteindre des zones de vitesse maximale (*i.e.*, 90-99% de V_{max}) contre 53% chez les arrières. Ces résultats démontrent que les capacités d'accélération sont à *minima* aussi importantes que les qualités de vitesses en rugby à XV. Dans ce contexte, il a été rapporté que la capacité d'un joueur à modifier rapidement sa vitesse est liée à la performance en compétition (Den hollander et al, 2016). De façon générale, la majorité des accélérations lors d'un match de rugby sont comprises entre 1 et 2 $m.s^{-2}$ (41.2 ± 7.6 %) alors que 37.7 ± 3.9 % et 21.1 ± 6 % du nombre total d'accélération était réalisé entre 2 et 3 $m.s^{-2}$ et supérieur à 3 $m.s^{-2}$ respectivement (Lacome et al., 2014). Les avants réalisent significativement moins d'accélération supérieures à 3 $m.s^{-2}$ (4.3 ± 2.7) et à 4 $m.s^{-2}$ (0.47 ± 0.84) que les arrières (6.4 ± 4.5 et 0.89 ± 1.37 accélérations supérieures à 3 $m.s^{-2}$ et 4 $m.s^{-2}$ respectivement). On retrouve des différences similaires entre les avants et les arrières dans le nombre de décélération intenses supérieures à 3 $m.s^{-2}$ (respectivement 7.5 ± 3.5 vs 9.5 ± 4.4 pour les avants et arrières) et 4 $m.s^{-2}$ (2.28 ± 1.65 vs 4.95 ± 3.00 pour les avants et arrières respectivement) pendant un match international U20 (Cunningham et al., 2016). Lors d'un match de rugby à XV, la majorité des accélérations (41.2 ± 7.6 %) sont comprises entre 1 et 2 $m.s^{-2}$ lorsque 37.7 ± 3.9 % étaient comprises entre 2 et 3 $m.s^{-2}$ et 21.1 ± 6 % supérieures à 3 $m.s^{-2}$ (Lacome et al., 2014). Parallèlement, la majorité des accélérations ont été mesurées à partir de vitesses faibles (marche-arrêt, 53.4 ± 5.5 %, jogging, 31.8 ± 5 %) (Lacome et al., 2014). En observant les accélérations intenses ($> 3 m.s^{-2}$), Lacome et al. (2014) ont démontré que le cinq de devant (*i.e.*, 1ère et 2ème ligne) et les troisièmes lignes produisaient un plus grand pourcentage d'accélération dont la vitesse moyenne de la phase d'accélération était inférieure à $7 km.h^{-1}$ comparé à l'ensemble des postes arrières alors que les troisièmes lignes réalisaient une plus grande proportion d'accélération intenses dont la vitesse moyenne de la phase d'accélération était comprise entre $7 km.h^{-1}$ et la vitesse du seuil lactique comparé à tous les autres postes. Enfin, les joueurs de première et deuxième ligne produisaient moins d'accélération $> 3 m.s^{-2}$ dont la vitesse

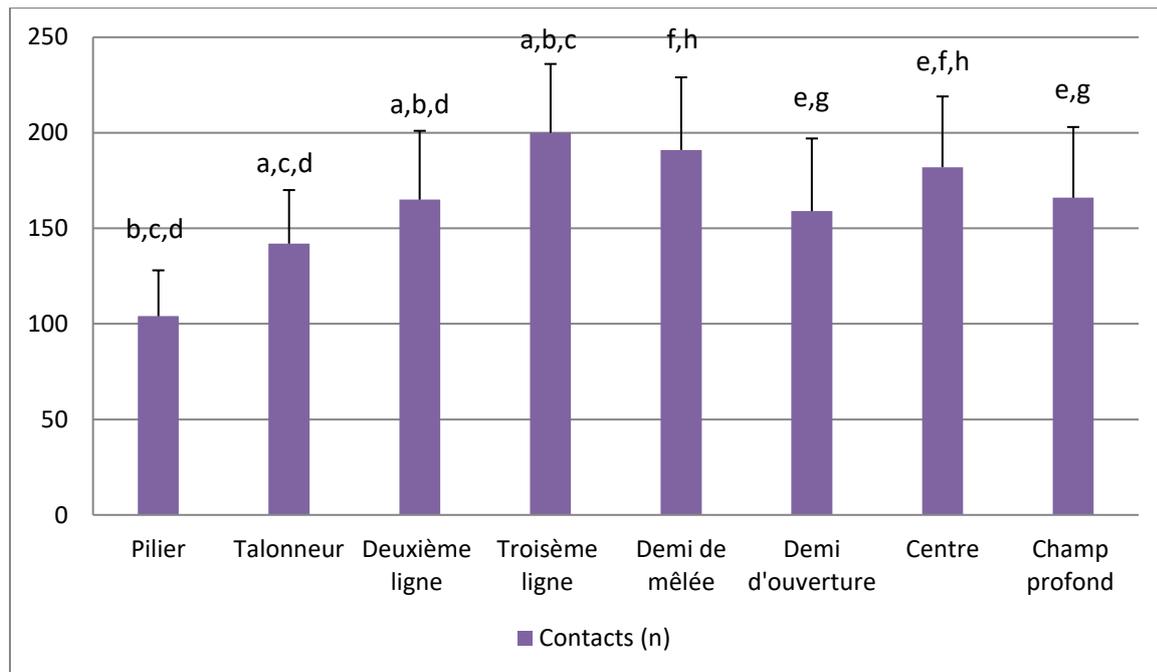
moyenne de la phase d'accélération était supérieure à VMA comparé à tous les autres postes.

3.2.7. Contacts & activité combattue

Comme évoqué précédemment, les différences dans les déplacements entre les avants et les arrières sont consensuelles. C'est également le cas lorsqu'on observe l'activité combattue lors d'un match de rugby à XV. Ainsi, il est généralement admis que les avants sont davantage concernés par les efforts de contact comparé aux arrières (Cousins et al., 2022). Alors que le nombre d'impacts < 6.5 g ne diffère pas significativement entre les avants et les arrières, on relève au moins trois fois plus d'impacts compris entre 6.5 et 7 g et entre 7 et 8 g étaient chez les avants (respectivement 161.6 ± 107 et 143.1 ± 122) que chez les arrières (respectivement 54.3 ± 28.9 et 29.8 ± 9) (Suarez-Arrones et al., 2012). Ces résultats sont similaires à ceux précédemment observés chez des joueurs de moins de 19 ans, montrant que les troisièmes lignes subissent le plus grand nombre total d'impacts (683.4 ± 295.04) lorsque les arrières intérieurs ont reçu le plus grand nombre d'impacts sévères (> 10 g) (12.16 ± 3.18) par match (Venter et al., 2011). En rugby, ces impacts sont obtenus lors de différents efforts de contact tels que les plaquages, les rucks, les mêlées et les mauls. Dans une étude qui analyse les profils d'activités de 20 joueurs de rugby à XV, Takamori et al. (2022) montrent que les avants ont des charges de contact plus élevées (35 ± 12 unités arbitraires) par rapport aux arrières (20 ± 6 , ES = 1,3), les troisièmes lignes ayant la charge de contact la plus élevée de toutes les positions de jeu (40 ± 13). Ramené au temps de jeu, (Pollard et al., 2018) comptabilisent significativement davantage d'effort de contact chez les avants ($0.5 + 0.1$ contact par minute) comparé aux arrières (0.3 ± 0.1 contact par minute) lors d'un match complet. Il est intéressant de noter que l'on observe des différences similaires lorsque le match est codé en temps de jeu effectif (respectivement 1.1 ± 0.2 vs 0.5 ± 0.1 contact par minute pour les avants et les arrières) (Pollard et al., 2018), mais également lors de la plus longue séquence de jeu d'un match où le cinq de devant et les troisièmes lignes subissent davantage de contacts que les arrières intérieurs et extérieurs (0.73 et 0.89 collisions par minute contre 0.28 et 0.41 collisions par minute respectivement) (Reardon et al., 2017b). Enfin, (Sheehan et al., 2022) ont récemment recensé le nombre de contacts pour l'ensemble des positions de jeu et constatent également que

les troisièmes lignes reçoivent le plus de contacts (200 ± 36) à l'échelle de l'équipe, alors que les piliers sont ceux qui en subissent le moins (104 ± 24).

Figure 3. Occurrence des efforts de contact quantifiés par accéléromètre en fonction des postes de jeu lors d'un match de rugby à XV d'après Sheehan et al., 2022.



Différence significative ($p < 0.05$) avec (a) pilier ; (b) talonneur ; (c) deuxième ligne ; (d) troisième ligne ; (e) demi de mêlée ; (f) demi d'ouverture ; (g) centre ; (h) champ profond.

Comme décrit précédemment, les efforts de contact peuvent être de différentes natures et apparaître dans des situations diverses concernant toutes les phases du jeu. Les événements de contact les plus couramment observés sont les plaquages, les rucks, les mauls et les mêlées (Ungureanu et al., 2021, Cousins et al., 2022). Au centre de l'activité en rugby à XV, l'activité combattue jouerait un rôle crucial pour la performance en match (Dubois et al., 2020). En effet, dans cette même étude, les auteurs rapportent que les équipes gagnantes possèdent des avants et des arrières qui réalisent respectivement 10.1 ± 3.7 et 5.3 ± 3.3 plaquages réussis alors que dans les équipes perdantes, les avants réalisent significativement moins de plaquages réussis (7.3 ± 3.4) alors que le nombre de plaquages réussis des arrières n'est pas

différent (4.8 ± 3.3). De façon équivalente, le nombre de plaquages offensifs réalisés par les avants serait déterminant de la réussite (2.1 ± 1.2 plaquages offensifs) ou de la défaite (1.3 ± 1.1 plaquages offensifs). Toutefois, le nombre de rucks ne serait pas un déterminant de l'issue d'un match chez les avants (17.4 ± 5.4 et 16.3 ± 5.0 rucks respectivement pour les équipes gagnantes et perdantes) comme chez les arrières (5.3 ± 4.9 et 5.6 ± 4.8 rucks respectivement pour les équipes gagnantes et perdantes).

3.2.8. Contraintes d'application de force horizontale

En rugby à XV, les joueurs sont confrontés à différents évènements, qui engendrent des efforts réalisés à différents niveaux de force et de vitesse (Quarrie et al., 2013; Takamori et al., 2022). Les règles et principes fondamentaux du jeu contraignent les joueurs à se déplacer constamment vers l'avant, avec ou sans le ballon et ce, quelle que soit la forme de jeu utilisée. Pour répondre à cette exigence, les joueurs organisent leur locomotion dans le but d'avancer, ce qui génère des contraintes d'application de force horizontale à différentes vitesses. La production d'une force horizontale élevée est un déterminant majeur de l'accélération du sprint, en particulier sur les courtes distances que les joueurs de rugby à XV rencontrent le plus souvent (Deutsch et al., 1998). Ainsi, Smart et al. (2014) rapportent que la performance de sprint sur une courte distance (10 m) mais pas sur des distances plus longues (20 m pour les attaquants et 30 m pour les arrières) est associée au nombre de franchissements et de plaquages cassés chez les joueurs de rugby à XV. Ces résultats sont confirmés plus tard par l'étude de Den Hollander et al. (2016) qui observent une corrélation significative entre la vitesse de course du porteur du ballon et le nombre de franchissements lors de la saison 2013 de super rugby. Ces résultats soulignent l'importance de l'application d'une force horizontale élevée pour être efficace dans les sports collectifs dans lesquels l'orientation de la force appliquée au sol s'est avérée être un déterminant critique de l'accélération du sprint (Morin et al., 2011, Morin et al., 2012) et peut être liée au nombre de défenseurs battus et de plaquages dominants chez les joueurs de rugby à sept (Ross et al., 2015). Toutefois, à ce jour, la majorité des études ont établi des liens entre différentes composantes mécaniques du sprint évaluées en ligne droite et la performance en ligne droite (Cahill et al., 2019, Samozino et al., 2022) alors que le rugby à XV est constitué d'une majorité d'efforts de contacts et de changement de directions.

3.3. Répétition d'efforts à haute intensité

Si la production d'un effort de haute intensité est considérée comme capitale pour la performance lors d'une séquence de jeu en rugby à XV, la répétition de ces efforts au cours d'un match est tout aussi importante et déterminante de l'issue d'un match entier.

3.3.1. Répétition de sprints (RSE) et Capacité à répéter des sprints (RSa)

3.3.1.1. Définitions

Une série de répétitions de sprints (Repeated Sprint Exercise : RSE) est définie comme une réitération d'efforts brefs (< 10 s) d'intensité maximale entrecoupés de périodes de récupération brèves et incomplètes (généralement < 90 s) (Girard et al., 2011).

La capacité à répéter des sprints (Repeated Sprint Ability : RSa) est définie comme la capacité d'un athlète à être performant lors de RSE (Girard et al., 2011). Dans les sports collectifs comme le rugby à XV, la RSA est un facteur déterminant de la performance (Bishop et al., 2011, Gabbett et al., 2013, Spencer et al., 2005). La RSa s'évalue en général par 2 types de mesures : des mesures de performance totale (temps de sprint, puissance mécanique, vitesse maximale atteinte) réalisée lors d'un RSE (en additionnant les performances de chaque sprint), et des évaluations de l'évolution de ces performances au décours des répétitions de sprint (décrément de vitesse par exemple) (Bishop et al., 2003, Fornasier santos et al., 2018). La littérature concernant la RSa sera plus détaillée dans le chapitre 3.2.2.

3.3.1.2. Relation entre la RSa et la performance en match

Au cours des dernières décennies, la capacité à répéter les efforts de haute intensité a été considérée comme un facteur déterminant de la performance en sports collectifs (Bishop et al., 2011, Girard et al., 2011, Rossignol et al., 2014). En rugby à XIII, il a été montré que les exigences physiques d'une équipe étaient supérieures lors d'un match

gagné comparé à un match perdu. Ces résultats suggèrent que l'issue des matchs de rugby à XIII d'élite est étroitement liée à la capacité des équipes gagnantes à maintenir une intensité de jeu plus élevée que leurs homologues moins performants (Gabbett et al., 2013). En rugby à XV, une étude qui a évalué les relations entre les qualités physiques de 510 joueurs professionnels et les indicateurs clés de performance en compétition au cours de 296 matchs montre que la RSa chez les avants est significativement corrélée au ratio d'activité (nombre d'actions réalisées par un joueur / temps de jeu) ($r = -0.38$, corrélation modérée), au nombre d'essais marqués ($r = -0.24$, corrélation faible), au nombre de grattages (action de contester le ballon au sol) ($r = -0.21$, corrélation faible) et au nombre de passes réussies ($r = -0.10$, corrélation faible) réalisés par les joueurs (Smart et al., 2014). En revanche, aucune relation significative entre RSa et indicateurs de performance n'est observée dans cette étude chez les arrières (Smart et al., 2014). De façon similaire, (Gabbett et al., 2013) montrent chez 38 joueurs internationaux de rugby à XIII, que la RSa est significativement corrélée au nombre d'efforts de contacts par minute de jeu ($r = 0.33$).

3.3.2. Répétition d'efforts à haute intensité (RHIE) et Capacité à répéter des efforts de haute intensité (RHIEa)

3.3.2.1. Définitions

Le rugby à XV n'est toutefois pas caractérisé que par des répétitions de sprints, mais aussi d'efforts maximaux de différentes natures impliquant différentes conditions de force et de vitesse, en particulier les efforts de contact. Dans ce contexte, une répétition d'efforts à haute intensité (Repeated high intensity efforts : RHIE) est définie comme une séquence d'au moins 3 efforts de haute intensité avec 21s de récupération entre chaque (Black et Gabbett., 2015). La capacité à être performant lors de ces RHIE est alors appelée « Repeated high intensity efforts ability : RHIEa ».

Austin et al. (2011b) sont les premiers à avoir développé le concept de RHIE en incluant les sprints et les contacts en rugby à XIII. Ces auteurs ont réadapté les données proposées initialement par (Spencer et al., 2004) qui, à partir de l'analyse de l'activité de hockey sur gazon, définissaient une répétition de sprints par une série d'au moins 3 sprints entrecoupés par maximum 21 secondes de récupération. De cette

façon, Austin et al. (2011b) ont défini une séquence de RHIE par une série de 3 efforts de haute intensité (sprint, ruck, plaquage, maul ou mêlée) entrecoupés de phases de récupération entre chaque effort ne dépassant pas 21 secondes. Plus tard, Gabbett. (2012) proposait d'ajouter les accélérations aux efforts inclus dans les RHIE en raison de leur fréquence supérieure à celle des sprints lors d'un match de rugby à XIII. Cette définition sera utilisée en rugby à XV (Jones et al., 2015, Sheehan et al., 2022) et également en rugby à VII (Couderc et al., 2019). Par ailleurs, la généralisation de l'utilisation des CAC a permis aux scientifiques d'établir des seuils d'intensité pour les efforts courus (sprints et accélérations) en dessous desquels l'effort ne serait pas comptabilisé dans une séquence de RHIE. La plupart des études s'appuient sur les travaux de (Aughey et al., 2010) et de (Black et Gabbett., 2015) qui ont respectivement défini les seuils d'accélération intense $\geq 2.79 \text{ m.s}^{-2}$ et de course intense $> 5 \text{ m.s}^{-1}$. Toutefois, les technologies actuelles ne permettent pas de quantifier avec précision les différents niveaux d'intensité sur les efforts de contact. De ce fait, au final, la définition d'un RHIE établie et acceptée à ce jour correspond à une séquence de trois efforts intenses ou plus entrecoupés de moins de 21 s de récupération entre chacun d'eux. Les efforts intenses comprennent les accélérations ($\geq 2.79 \text{ m.s}^{-2}$), les courses à haute intensité ($> 5,0 \text{ m.s}^{-1}$) ou les efforts de contact (tels que les plaquages, les rucks, les mêlées ou les mauls) (Black et Gabbett., 2015; Sheehan et al., 2022).

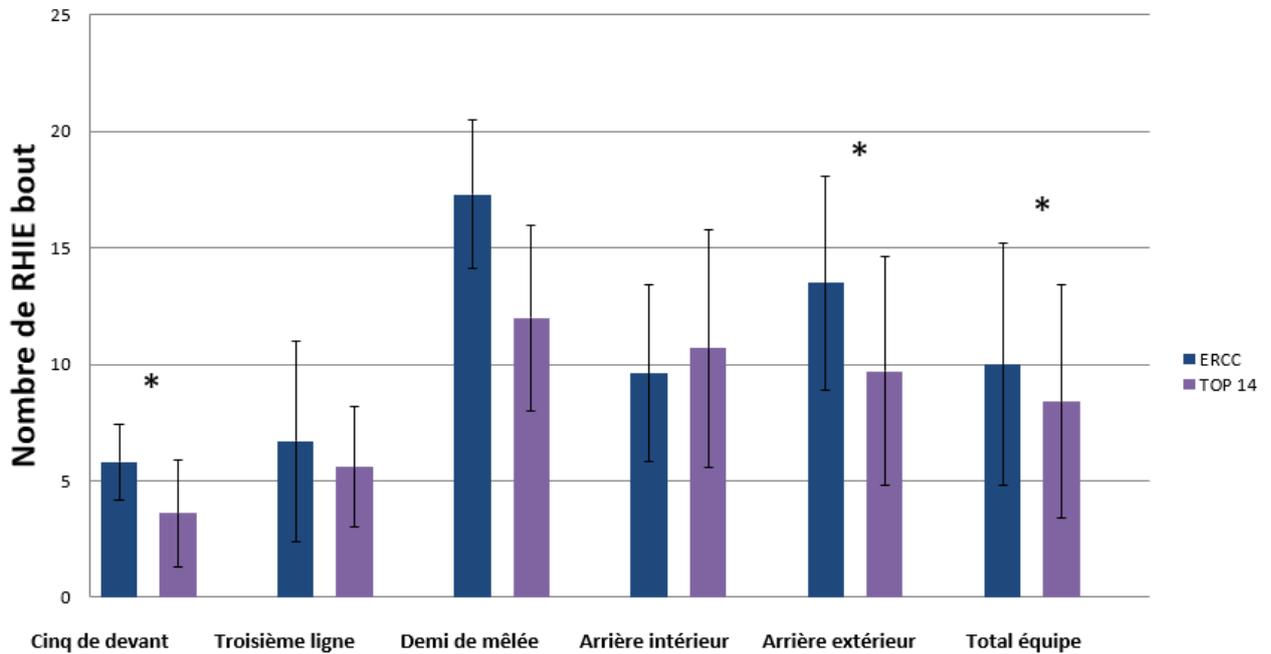
3.3.2.2. Occurrence des RHIE en compétition

L'intérêt scientifique concernant la production de RHIE en rugby à XV, à XIII et même à VII a considérablement augmenté cette dernière décennie. La multiplication des observations a permis de caractériser l'apparition des RHIE en match et d'établir leur importance pour la performance. Durant un match complet, les joueurs du champ profond réalisent significativement moins de RHIE que le reste de l'équipe alors qu'aucune différence n'est relevée entre le cinq de devant, les troisièmes lignes et les arrières intérieurs (Table 3) (Austin et al., 2011b). Ces résultats sont partiellement confirmés par (Jones et al., 2015) qui mesurent un nombre supérieur de RHIE produits par les troisièmes lignes comparé aux demis, et aux champs profonds. Plus récemment, (Sheehan et al., 2022) ont recensé la fréquence d'apparition des RHIE au cours de matchs élite selon le poste de jeu (Table 3). Dans cette étude, les auteurs confirment en partie la littérature précédente et montrent que, chez les avants, les piliers sont les joueurs qui réalisent le moins de RHIE, alors que les troisièmes lignes

en accomplissent le plus. Toutefois, contrairement aux données précédemment rapportées, les auteurs rapportent que les arrières réalisent un nombre supérieur de RHIE à celui de l'ensemble des avants lorsque les centres et les champs profonds en produisent plus que les demis. Ces résultats sont cohérents avec ceux avancés par Fornasier-Santos et al. (2021) qui rapportaient également que les arrières achevaient davantage de RHIE que les joueurs avants (Table 3). D'après ces résultats, on perçoit une distinction claire entre les résultats des premières études s'intéressant aux RHIE en match et les résultats des études plus récentes. Ces différences peuvent s'expliquer par la définition des séquences RHIE qui a évolué au cours du temps, en particulier avec l'ajout des courses à des vitesses supérieures à 5 m.s^{-1} qui favorise la production de RHIE chez les arrières.

La production des RHIE n'est toutefois pas régulière au cours d'un match de rugby à XV, puisque le nombre de RHIE diminue significativement en seconde mi-temps lors de matchs de rugby à XV (Fornasier-Santos et al., 2021). Ceci est vérifié pour l'ensemble des postes de jeu (Sheehan et al., 2022). Par ailleurs, le nombre de RHIE diffère selon le niveau de compétition (Fornasier-Santos et al., 2020). Les chercheurs de cette étude ont effectivement montré une fréquence de RHIE significativement plus élevée en coupe d'Europe qu'en top 14 (10.0 ± 5.2 vs 8.4 ± 5.0 RHIE par match en moyenne). Ces différences concerneraient plus particulièrement le cinq de devant (5.8 ± 1.6 vs 3.6 ± 2.3 RHIE par match en moyenne) et le champ profond (13.5 ± 4.6 vs 9.7 ± 4.6 RHIE par match en moyenne).

Figure 4. Nombre de RHIE en match en fonction du poste et du niveau de compétition (European Rugby Champions Cup ; ERCC vs TOP 14).



* : $p < 0.05$

3.3.2.3. Durée des séquences RHIE en compétition

La durée des RHIE peut varier en fonction des postes de jeu. En effet, chez les avants, les joueurs de troisième ligne produisent les RHIE les plus longs comparés à ceux des joueurs du cinq de devant (Table 3). Chez les arrières, la durée moyenne d'un RHIE est significativement inférieure à celle des avants et notamment deux fois inférieure à celle des troisièmes lignes concernant les arrières intérieurs (Austin et al., 2011b). La récupération entre chaque RHIE est également dépendante du poste de jeu, les avants disposant d'une durée de récupération inférieure à celle des arrières (Table 3). Des résultats similaires ont été rapportés par Jones et al. (2015) ; de plus, ces auteurs montrent que, bien que la durée de récupération des avants entre les séquences RHIE soit inférieure à celle des arrières, le temps de récupération entre chaque effort à l'intérieur d'une séquence RHIE est à l'inverse plus court chez les arrières que chez les avants. La durée moyenne de récupération entre chaque effort d'une séquence RHIE s'élève à 8.1 ± 2.0 s et à 7.3 ± 1.2 s respectivement chez le cinq de devant et les troisièmes lignes, alors que celle des demis, arrières intérieurs et arrières extérieurs

n'est respectivement que de $6.5 \pm 2.3s$, $4.9 \pm 1.6s$ et $4.7 \pm 1.9s$. Ces données ont plus récemment été confirmées par Fornasier-Santos et al. (2020) qui ont également montré que le niveau de compétition (i.e., Coupe d'Europe vs TOP 14) n'affectait pas les durées des séquences RHIE et des récupérations entre chaque séquence.

3.3.2.4. Composition des séquences RHIE en compétition

Du fait de la multiplicité des types d'efforts de haute intensité comptabilisés dans une séquence RHIE, la composition de ces dernières peut être très variable, elle dépend également du poste de jeu.

Premièrement, alors que des études antérieures (Table 3) ne rapportent aucune différence entre les postes de jeu dans le nombre moyen d'efforts par séquence RHIE (Jones et al., 2015, Fornasier-Santos et al., 2020) ni dans le nombre maximal d'efforts par séquence RHIE (Fornasier-Santos et al., 2020), une étude récente portant sur l'analyse des profils d'activité de 33 matchs d'élite suggère que le nombre d'efforts par RHIE diffère selon le poste de jeu occupé. Dans leur étude, Sheehan et al. (2022) montrent que les RHIE des troisièmes lignes comprennent plus d'efforts que ceux des autres avants. A l'inverse, le nombre moyen d'efforts par RHIE ne diffère pas entre les différents postes des arrières. Toutefois, Ces données nécessitent un plus grand nombre d'analyses afin d'obtenir davantage de consensus scientifique.

Deuxièmement, la composition des séquences RHIE peut varier par la nature des efforts réalisés par les athlètes. Dans leur étude analysant les séquences RHIE durant 20 matchs de super 14, Austin et al. (2011b) montrent que la nature des efforts durant les RHIE s'accorde aux profils d'activité pour lesquels il est admis que les avants sont davantage concernés par les phases statiques et les efforts de contact lorsque les arrières produisent un plus grand nombre de déplacements à haute vitesse (Cousins et al., 2022). Ainsi, les RHIE des avants sont composés majoritairement de mêlées, rucks et mauls (Table 3). A l'inverse, les RHIE des arrières intérieurs et extérieurs sont composés majoritairement de sprints, un peu moins de plaquages, alors que les mauls, rucks et les mêlées représentent logiquement moins de 20% des efforts.

En rugby, le nombre de RHIE réalisés est un élément crucial dans le succès d'un match (Hulin et al., 2015). En effet, dans une étude où les chercheurs examinaient les différences d'exigences physiologiques en fonction du résultat du match pour 22

joueurs de rugby à XIII, (Gabbett., 2013) observaient un nombre de RHIE différent en fonction du résultat du match. Comparé aux équipes perdantes, les équipes gagnantes réalisaient davantage de séquences RHIE (respectivement 11.4 ± 0.9 vs 13.9 ± 1.1 , $ES = 0.42$), composées d'un nombre moyen d'efforts par séquence supérieur (respectivement 4.1 ± 0.2 vs 4.5 ± 0.2 , $ES = 0.40$) et d'un nombre maximal d'effort par séquence également plus élevé (respectivement 6.2 ± 0.4 vs 7.9 ± 0.7 , $ES=0.51$).

Table 3. Synthèse des connaissances sur les RHIE en rugby.

Référence	Rugby code	Occurrence des RHIE (Nombre par match)		Durée moyenne des RHIE (s)		Composition des RHIE		Récupération moyenne entre les RHIE		Nombre d'effort moyen par séquence	
		Postes	Comparaisons	Postes	Comparaisons	Postes	Comparaisons	Postes	Comparaisons	Postes	Comparaisons
Austin et al., 2011	Rugby à XV	CD : 15 ± 3 TL : 17 ± 4 AI : 16 ± 2 AE : 7 ± 3	AE < a tous	CD: 45 ± 9s TL: 52 ± 7s AI: 26 ± 4 AE: 28 ± 4	CD et TL > AI et AE	CD : environ 30 % sprint, environ 17 % plaquages, 53% mêlées-ruck-maul TL : environ 25% sprint, environ 16% plaquages, 59% mêlées-ruck-maul AI : 45% sprint, 36% plaquages, 19% mêlées-ruck-maul AE : 45% sprint, 35% plaquage, 20% mêlée-ruck-maul	Sprint : p= 0.7 ; ES=1.33 Plaquage : p=0.34 ; ES=0.75 Mêlée-ruck-maul : CD et TL>AI et AE : p=0.003	CD: 274 ± 27s TL: 314 ± 124s AI: 317 ± 37s AE: 512 ± 109s	AE>CD	ND	ND
Jones et al., 2015	Rugby à XV	CD : 11 ± 8 TL : 13 ± 7 D : 5 ± 4 AI : 7 ± 7 AE : 6 ± 6	TL>D et AI	ND	ND	ND	ND	CD: 398 ± 219s TL: 457 ± 376s D: 612 ± 286s AI: 751 ± 463s AE : 551 ± 405s	AI>CD	CD : 4 ± 1 TL : 4 ± 1 D : 3 ± 0 AI : 3 ± 0 AE : 4 ± 0	NS
Sheehan et al., 2022	Rugby à XV	P: 2 ± 2 T: 7 ± 3 DL: 4 ± 2 TL: 9 ± 5 DM: 16 ± 4 DO: 12 ± 4 C : 18 ± 6 CP : 18 ± 6	P<Dolet TL P et DL<T< TL P<DL<T et TL TL>P, T et DL DO<DM, C et CP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	P: 3 ± 2 T: 5 ± 1 DL: 5 ± 1 TL: 6 ± 2 DM: 4 ± 2 DO: 4 ± 1 C : 4 ± 1 CP : 4 ± 1	TL>P, T et DL

Fornasier Santos et al., 2020	Rugby à XV	CD : 4.2 ± 2.3 TL : 6.0 ± 3.2 DM : 13.8 ± 4.5 AI : 10.4 ± 4.7 AE : 10.7 ± 5.1	DM>CD et TL AI>CD, TL et DM AE>CD, TL et DM	ND	ND	ND	ND	CD: 548 ± 303s TL: 643 ± 314s DM: 344 ± 68s AI: 513 ± 299s AE : 460 ± 269s	DM<CD et TL AE<TL	CD : 3.5 ± 0.5 TL : 3.5 ± 0.5 DM : 4.1 ± 0.4 AI : 3.7 ± 0.4 AE : 3.7 ± 0.4	DM>CD et TL AI>CD, TL et DM AE>CD, TL et DM
Couderc et al., 2023	Rugby à VII	Avants : 26.5 ± 6.7 Arrières : 26.8 ± 6.7	Arrières vs Avants Diff : 1.1 ± 8.5 % ES= 0.04 ± 0.31	Avants : 39.0 ± 12.3 s Arrières : 40.3 ± 9.1 s	Arrières vs Avants Diff : 0.2 ± 9.1 % ES= 0.01 ± 0.32	Avants Haute vitesse : 27 ± 11 % Accélération : 36 ± 12 % Arrières Haute vitesse : 28 ± 10 % Accélération : 31 ± 11 % Collision : 38 ± 14 %	Arrières vs Avants Haute vitesse : 8.3 ± 12.9 %, ES= 0.20 ± 0.31 Accélération Diff : -15.9 ± 10.0 %, ES= -0.47 ± 0.31 Arrières Haute vitesse : 181.1 ± 86.6 %, ES= 0.65 ± 0.31 Collision Diff : 5.8 ± 12.3 %, ES= 0.15 ± 0.31	Récupération entre les efforts Avants : 8.7 ± 2.5 s Arrières : 9.2 ± 2.5 s	Arrières vs Avants Diff : 2.9 ± 8.7 %, ES= 0.10 ± 0.32	Avants 3 efforts : 52 ± 32 % ; 4 efforts : 27 ± 29 % 5 efforts : 11 ± 17 % 6 efforts : 6 ± 13 % ≥7 efforts : 4 ± 9 % Arrières 3 efforts : 56 ± 30 % 4 efforts : 22 ± 22 % 5 efforts : 11 ± 20 % 6 efforts : 5 ± 16 % ≥7 efforts : 6 ± 15 %	Arrières vs Avants 3 efforts : Diff : 8.4 ± 18.8 %, ES= 0.14 ± 0.31 4 efforts : Diff : -18.2 ± 29.7 %, ES= -0.19 ± 0.31 5 efforts : Diff : -2.5 ± 52 %, ES= -0.02 ± 0.32 6 efforts : Diff : -14.0 ± 78.0 %, ES= -0.06 ± 0.32 7 efforts : Diff : 43.0 ± 105.5 %, ES= 0.13 ± 0.32

CD, cinq de devant ; TL, troisième ligne ; AI, arrières intérieurs ; AE, arrières extérieurs ; D, demis ; DM, demi de mêlée ; DO, demi d'ouverture ; P, pilier ; T, talonneur ; DL, deuxième ligne ; C, centre ; CP, champ profond ; ND, non disponible.

La nature des efforts réalisés à l'intérieur des séquences RHIE pourrait aussi fortement influencer l'activité des joueurs en match (Johnston, Gabbett, et Jenkins., 2015). Dans cette étude, les auteurs ont comparé la performance physique (distance parcourue, intensité) entre deux périodes de 10 minutes de jeux réduits, selon le nombre d'efforts de contacts (i.e., lutte de 5 secondes) réalisés par les joueurs. Alors qu'aucune variation significative n'était observée entre les deux périodes dans les jeux comprenant un ou deux contacts, la distance relative entre les deux périodes du jeu était significativement réduite lorsque le jeu comprenait 3 efforts de contact ($ES = 20.40 \pm 0.24$). Ces résultats montrent que l'intensité de la course diminue à mesure que le nombre d'efforts de contact répétés augmente. L'année suivante, (Johnston et al., 2016) confirment leurs données en montrant l'impact de différentes compositions de séquences RHIE sur les profils d'activité des joueurs durant deux jeux réduits de 5 minutes. Après avoir réalisé des RHIE à dominante de course, les joueurs maintiennent des intensités de course similaires pendant les deux jeux réduits. En revanche, l'intensité relative de déplacement au cours du deuxième jeu est réduite lorsque le premier jeu comporte un RHIE « tout contact » ($ES = -0,96 \pm 0,42$) et « contact majoritaire » ($ES = -1,07 \pm 0,34$). De plus, la réalisation de séquences RHIE semble aussi altérer la qualité des plaquages (Gabbett et al., 2016) : chez des joueurs de rugby à XIII semi-professionnels, lorsque plus de 4 séquences RHIE se succèdent, l'efficacité de plaquage diminue de $34.1 \pm 24.3 \%$ ($ES = -1,17 \pm 0,60$). Ces données suggèrent que la composition et la réalisation des séquences RHIE ont également une influence sur la qualité technique des joueurs en match.

3.3.3. Fatigue lors d'un match de rugby à XV

L'augmentation de la quantité de données collectées durant un match de rugby à XV permet d'accroître la précision des analyses et facilite la mesure de la fatigue au cours d'un match chez les joueurs. Généralement basée sur la comparaison de plusieurs périodes de temps telles que les mi-temps (Sheehan et al., 2022) ou les périodes de 10 minutes (Jones et al., 2015), les chercheurs identifient la fatigue par des différences d'intensités physiques entre les périodes étudiées. Ainsi, l'intensité des efforts produits par les joueurs est significativement inférieure lors de la deuxième mi-temps (Sheehan

et al., 2022 Fornasier-Santos et al., 2021). Plus précisément, la distance parcourue est inférieure dans les périodes 50^{ème} -60^{ème} min et 70^{ème} -80^{ème} minutes comparées à la période 0-10^{ème} (Roberts et al., 2008). De même, le nombre d'accélération (entre $2\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ et $3\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$), le volume de contraintes musculaires (Playerload) et de la distance relative ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) dans la période 60^{ème} -70^{ème} min sont inférieurs comparés à l'ensemble des périodes de 10 min de la première mi-temps (Jones et al., 2015). Plus récemment, une étude comparant les performances locomotrices en match selon des tranches de 20 minutes chez 34 joueurs professionnels du TOP 14 démontre également des réductions importantes dans la période 60-80 min comparée aux autres périodes de 20 min du match concernant la distance parcourue entre $14\text{-}18\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ alors qu'une diminution de la distance parcourue à haute intensité ($>18\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) est enregistrée en comparaison avec les périodes 20-40 et 40-60. Enfin, le nombre de RHIE produits par 40 rugbymen élite diminue significativement entre la première et la deuxième mi-temps, et ce, pour l'ensemble des postes de jeu (Sheehan et al., 2022).

Par ailleurs, les efforts de contact engendrent également des conséquences physiologiques. Dans ce contexte, Roe et al. (2017b) ont comparé l'évolution de marqueurs de fatigue après un entraînement avec et sans contact. Les auteurs observent ainsi que durant l'entraînement, l'inclusion du contact augmente la fréquence cardiaque moyenne de $9,7 \pm 3,9\%$ et l'intensité perçue de l'effort (RPE) de $42 \pm 29,2\%$, avec une élévation de la concentration sanguine en Créatine Kinase [CK] de $88.2 \pm 40.7\%$ 24h après l'entraînement avec contact contre $3.7 \pm 8\%$ 24h après l'entraînement sans contact témoignant ainsi de dommages musculaires importants. De plus, l'entraînement avec contacts altère davantage la fonction neuromusculaire du haut du corps (évaluée par des pompes pliométriques) comparé à l'entraînement sans contact ($-7.3 \pm 4.7\%$ contre $2.7 \pm 5.9\%$ respectivement). A l'inverse, les auteurs mesurent une fatigue neuromusculaire du bas du corps (évaluée par un CMJ) plus élevée pour l'entraînement sans contact comparé à l'entraînement avec contact ($-5.6 \pm 5.2\%$ contre $2.3 \pm 2.4\%$, respectivement) alors que l'intensité de course et la distance parcourue étaient supérieures pendant l'entraînement sans contact ($19.8 \pm 5\%$ et $27.5 \pm 5.3\%$ respectivement). Ces derniers résultats confirment ceux avancés par Johnston, Gabbett, et Jenkins. (2015) décrits dans le chapitre précédent. Toutefois, la fatigue engendrée par les efforts de contact pourrait être limitée par le niveau de condition

physique. Des relations significatives ont été observées entre la performance au 30-15IFT et la course à haute intensité pendant le jeu réduit à simple contact ($r = 0,72$) et à double contact ($r = 0,75$), mais pas à triple contact ($r = 0,20$) ce qui montre que l'aptitude à la course à haute intensité n'est associée à la performance de course que lorsque les demandes de contact sont faibles (Johnston, Gabbett, et Jenkins., 2015). Par ailleurs, les augmentations de la CK dans le sang sont plus importantes dans le groupe de faible performance au YYIRT comparé au groupe ayant les meilleures performances à 24 heures (176 % contre 73 % respectivement; ES = 1.50) et 48 heures après la rencontre (80 % contre 28 % respectivement ; ES = 1.22) (Johnston, Gabbett, et Jenkins., 2015).

4. Caractéristiques du joueur de rugby à XV

4.1. Caractéristiques anthropométriques

En rugby à XV, il existe de grandes différences de morphologie en fonction du poste de jeu (Table 4). De façon générale, les avants ont une masse corporelle et une taille plus importante que les arrières (Stoop et al., 2018, Lacomme et al., 2014). Durant ces dernières décennies, les caractéristiques morphologiques des joueurs ont nettement évolué en raison de la professionnalisation des joueurs. Dans ce contexte, entre les saisons 1988-1989 et 2008-2009, ces derniers sont devenus significativement plus lourds, avec une masse corporelle augmentée de 12,3 kg chez les avants et 12 kg chez les arrières et plus grands avec une augmentation de 2.9 cm pour les avants et 5.4 cm pour les arrières (Sedeaud et al., 2013). Cette hausse de la masse corporelle permet, en particulier chez les avants, de mieux prévenir les blessures liées aux contacts, d'être plus performant en étant plus dominant dans ces contacts et en développant une force supérieure en mêlée (Brazier et al., 2018). De nombreux auteurs décrivent également de nettes différences de composition corporelle selon les postes (Stoop et al., 2018), avec un pourcentage de masse grasse plus élevé chez les avants que chez les arrières (Posthumus et al., 2020). La composition corporelle est

également considérée comme un facteur de performance en rugby à XV car la réduire permet d'améliorer le rapport masse-force et masse-puissance (Posthumus et al., 2020) et améliore la performance sur l'ensemble des efforts (Duthie et al., 2003).

Table 4. Caractéristiques anthropométriques des joueurs de rugby à XV.

Référence	Population	Poste	Masse (kg)	Taille (cm)	Masse grasse (%)
Sedeaud et al., 2013		Avants	107.8	188.2	ND
		Arrières	87.8	181.6	ND
Cunniffe et al., 2009		Avants	115 ± 6	190 ± 10	ND
		Arrières	93 ± 5	182 ± 10	ND
Lacôme et al., 2014		Avants	108.3 ± 8.2	188 ± 7	15.5 ± 5.5
		Arrières	94.0 ± 8.2	183 ± 5	13.5 ± 4.8
Posthumus et al., 2020	Senior professionnel	Avants	116.5 ± 10.1	190.9 ± 5.9	17.8 ± 2.4
		Arrières	95.9 ± 9.4	183.0 ± 7.5	14.8 ± 1.2
Vachon et al., 2021	Espoir	Avants	104.8 ± 10.3	184.9 ± 7.8	18.8 ± 4.2
		Arrières	81.7 ± 7.4	179.7 ± 5.2	11.5 ± 2.0
Fornasier-santos., 2018	Senior professionnel	Pilier gauche	117.3 ± 8.6	1.83 ± 0.02 m	21.9 ± 2.4
		Talonneur	106.4 ± 3.1	ND	20.8 ± 1.1
		Pilier droit	124.2 ± 9.1	1.86 ± 0.04 m	20.3 ± 3.1
		Deuxième ligne	116.5 ± 5.9	1.98 ± 0.03 m	17.2 ± 3.0
		Troisième ligne	110.9 ± 6.3	1.91 ± 0.06 m	17.0 ± 2.4
		Demi de mêlée	82.3 ± 6.8	1.75 ± 0.04 m	12.1 ± 0.9
		Demi d'ouverture	84.8 ± 2.4	ND	18.1 ± 1.8
		Centre	102.6 ± 17.2	1.81 ± 0.03 m	16.9 ± 5.2
		Ailier	100.3 ± 7.8	1.84 ± 0.08 m	15.1 ± 3.0
Arrière	93.6 ± 4.1	1.86 ± 0.02 m	15.8 ± 3.2		

ND : Non Disponible

4.2. Caractéristiques physiologiques et biomécaniques

Comme décrit précédemment, les profils d'activités des joueurs sont très différents en fonction du poste de jeu, et conduisent à des exigences physiologiques et biomécaniques variables durant un match de rugby (Roberts et al., 2008; Cunniffe et al., 2009). Ces contraintes sont directement liées aux aptitudes biologiques développées par les joueurs.

4.2.1. Force maximale

La force maximale (F_{max}) est définie comme la capacité d'un athlète à déplacer une charge maximale. De façon générale, elle est évaluée en mesurant la masse pouvant être mobilisée une fois au maximum (1 répétition maximale : 1RM) lors de mouvements mono- ou pluri-articulaires. En fonction des mouvements étudiés, la force maximale peut être mesurée sur le plan vertical ou horizontal.

En rugby à XV, les caractéristiques neuromusculaires diffèrent entre les avants et les arrières (Brazier et al., 2018). Quelques exemples de niveaux de force maximale développée par les joueurs de rugby à XV sur des mouvements standardisés sont présentées dans le tableau 5. D'après ce dernier, on observe que les avants ont un niveau de force maximale supérieur à celui des arrières aussi bien concernant le haut du corps que le bas du corps (Posthumus et al., 2020). Les piliers sont les plus forts alors que les demis sont les joueurs avec la force maximale la plus basse (Smart et al., 2013). Toutefois, en dépit des différences de force maximale absolues du haut et du bas du corps entre les avants et les arrières, les différences en force relative à la masse corporelle semblent s'atténuer entre les deux groupes (McMaster et al., 2016).

Table 5. Niveaux de force maximale en rugby à XV

Référence	Test de force	Performance de force	Différences
<i>Force bas du corps</i>			
Posthumus et al., 2020	Back squat 1RM	Total équipe : 189.3 ± 25.1 kg Avants : 197.2 ± 26.5 kg Arrières : 178.1 ± 18.3 kg	Diff : 10.7 ± 8.4% ES : 0.81 ± 0.34
Smart et al., 2013	Back squat 1 RM	P: 184 ± 19 kg T: 175 ± 20 kg DL: 141 ± 21 kg TL: 161 ± 21 kg D: 141 ± 20 kg C: 151 ± 17 kg CP: 145 ± 24 kg	ND
Smart et al., 2014	Back squat 1 RM	Avants : 186 ± 35 kg Arrières : 168 ± 32 kg	ND
Crewther et al., 2009	Box squat 1RM	<i>Absolue</i> Avants : 202 ± 30.6 kg Arrières : 171.1 ± 21.2 kg <i>Relative</i> Avants : 8.85 ± 1.27 kg/kg pdc Arrières : 8.38 ± 1.24 kg/ kg pdc	Absolue : p<0.01 Relative : NS
Crewther et al., 2012	IMTP	<i>Force pic absolue</i> Total équipe : 2634.1 ± 371.9 N CD : 2676.4 ± 371.7 N TL : 2687.8 ± 357.9 N AI : 2554.0 ± 392.5 N AE : 2574.6 ± 384.2 N <i>Force pic relative</i> Total équipe : 25.8 ± 4.2 N.kg ⁻¹ AI : 28.1 ± 3.8 N.kg ⁻¹	Force pic absolue : NS Force pic relative : TL<AI, p<0.05

		AE : 27.1 ± 4.9 N.kg ⁻¹ CD: 25.2 ± 3.2 N.kg ⁻¹ TL: 23.9 ± 4.0 N.kg ⁻¹	
(Appleby et al., 2012)	Back squat 1 RM	<i>Absolute</i> 164.6 ± 31.5 kg <i>Relative</i> 1.55 ± 0.24 kg/kg pdc	ND
Vachon et al., 2021	Back squat 6 RM	<i>Absolute</i> Total équipe : 149.9 ± 27.5 kg Avants : 162.3 ± 26.9 kg Arrières : 136.8 ± 22.1 kg <i>Relative</i> Total équipe : 1.61 ± 0.25 kg/kg pdc Avants : 1.55 ± 0.20 kg/kg pdc Arrières : 1.68 ± 0.27 kg/kg pdc	<i>Absolute</i> P<0.05 ES :1.03 <i>Relative</i> NS
Johnston et al., 2014	Back squat 1 RM	Total équipe : 154.0 ± 21.5 kg	ND
Johnston et al., 2015	Back squat 3 RM	Groupe haut niveau : 145 ± 17 kg Groupes bas niveau : 119 ± 9 kg	ND
<i>Force haut du corps</i>			
Posthumus et al., 2020	Développé couché 1RM	Total équipe : 141.5 ± 14.6 kg Avants : 146.1 ± 14.2 kg Arrières : 135.0 ± 12.8 kg	Diff : 8.2 ± 6.7% ES : 0.81 ± 0.34
Smart et al., 2013	Développé couché 1RM	P: 133 ± 18 kg T: 124 ± 17 kg DL: 121 ± 17 kg TL: 119 ± 16 kg D: 111 ± 16 kg C: 113 ± 15 kg CP: 109 ± 16 kg	ND
Smart et al., 2014	Développé couché 1RM	Avants : 136 ± 19 kg	ND

		Arrières : 125 ± 17 kg	
Crewther et al., 2009	Développé couché 1RM	<i>Absolue</i> Avants : 167.4 ± 26.8 kg Arrières : 129.0 ± 13.6 kg <i>Relative</i> Avants : 7.16 ± 1.16 kg/kg pdc Arrières : 6.27 ± 0.60 kg/kg pdc	Absolue : p<0.001 Relative : p<0.05
(Appleby et al., 2012)	Développé couché 1RM	<i>Absolue</i> 132.5 ± 14.0 kg <i>Relative</i> 1.28 ± 0.13 kg/kg pdc	ND
Mac Master et al., 2016	Développé couché 1RM	<i>Absolue</i> Avants : 133.9 ± 9.6 kg Arrières : 110.9 ± 23.9 kg <i>Relative</i> Avants : 1.30 ± 0.13 kg/kg pdc Arrières : 1.24 ± 0.10 kg/kg pdc	Absolue : p=0.01 ; ES=0.96 Relative : NS ; ES=0.33
Vachon et al., 2021	Développé couché 1RM	<i>DC Absolue</i> Total équipe : 110.3 ± 16.5 kg Avants : 115.0 ± 17.2 kg Arrières : 105.3 ± 14.4 kg <i>DC Relative</i> Total équipe : 1.19 ± 0.17 kg/kg pdc Avants : 1.10 ± 0.17 kg/kg pdc Arrières : 1.29 ± 0.10 kg/kg pdc <i>TC Absolue</i> Total équipe : 106.9 ± 13.3 kg Avants : 113.3 ± 11.4 kg Arrières : 100.3 ± 11.4 kg <i>TC Relative</i> Total équipe : 1.16 ± 0.14 kg/kg pdc	<i>DC Absolue</i> NS <i>DC Relative</i> P<0.05 ES : 1.18 <i>TC Absolue</i> P<0.05 ES : 1.14 <i>TC relative</i> P<0.05 ES : 1.35

		Avants : 1.09 ± 0.14 kg/kg pdc Arrières : 1.23 ± 0.09 kg/kg pdc	
Johnston et al., 2014	Développé couché 1 RM	Total équipe : 124.0 ± 15.0 kg	ND
Johnston et al., 2015	Développé couché 3 RM	Groupe haut niveau : 113 ± 12 kg Groupes bas niveau : 91.5 ± 3 kg	ND
Fornasier-santos., 2018	Développé couché 1 RM Tirage couché 1 RM	<i>Développé couché</i> P : 130.0 ± 14.1 kg (gaucher), 152.5 ± 3.5 kg (droitier) T : ND DL : 112.5 ± 3.5 kg TL : 140.0 ± 20.0 kg D : 117.5 ± 10.6 kg (mêlée) et ND (ouverture) C : 136.7 ± 15.3 kg CP : 135.0 ± 14.1 kg (ailier) et 125.6 ± 8.8 kg <i>Tirage couché</i> P : 121.7 ± 2.9 kg (gaucher), 127.5 ± 2.5 kg (droitier) T: ND DL: 115 ± 7.1 kg TL: 129.0 ± 7.5 kg D: ND C : ND CP : 126.3 ± 5.3 kg (ailier) et 114 ± 5.3 kg	

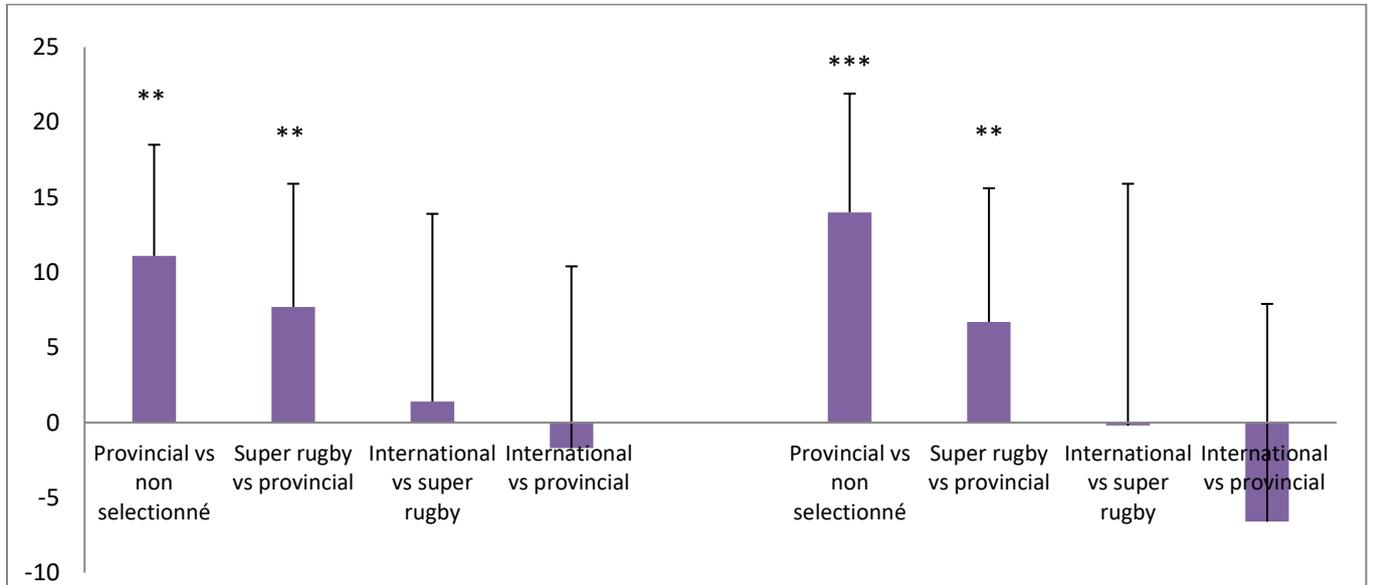
CD, cinq de devant ; AI, arrières intérieurs ; AE, arrières extérieurs ; P, pilier ; T, talonneur ; DL, deuxième ligne ; TL, troisième ligne ; D, demis ; C, centre ; CP, champ profond.

Le niveau de force maximale est un facteur déterminant de la performance en rugby à XV. Ainsi, la force maximale relative à la masse corporelle en Isometric Mid-Thigh Pull (IMPT) est corrélée aux gains de ligne d'avantage balle en main ainsi qu'à l'efficacité au plaquage en match chez les arrières ($r=0.533$ et 0.603 respectivement) (Gabbett., 2016). Toutefois, ces auteurs n'observent aucune relation significative entre la force maximale absolue en IMTP et les indicateurs de performance en match. Par ailleurs, l'efficacité au plaquage en condition de fatigue est significativement supérieure chez les joueurs dont la performance au back squat (1RM) est plus élevée (Gabbett., 2016). Ces résultats confirment ceux présentés par Smart et al. (2014), qui rapportent que la performance en back squat (1RM) est corrélée au nombre de plaquages réussis (faible corrélation ; $r=0.11$) alors que chez les arrières elle serait associée à davantage de ballons récupérés (faible corrélation ; $r=0.20$). La force produite au développé couché (1RM) est également liée au nombre de ballons récupérés chez les arrières (faible corrélation ; $r=0.20$) alors qu'elle n'est significativement corrélée à aucun indicateur clé de la performance en match (Smart et al., 2014). D'autre part, la force maximale des sujets semble être différente en fonction du niveau de compétition. Dans une étude qui comparait les qualités physiques entre des joueurs non sélectionnés, de niveau provincial, national (super rugby), et international, les auteurs rapportent que les plus grandes différences de force au squat (1RM) sont de 11.1 ± 7.4 % chez les avants et de 14.0 ± 7.9 % chez les arrières entre le niveau provincial et les joueurs non sélectionnés. (Figure 5).

Les auteurs rapportent des résultats similaires pour la force maximale en développé couché (1 RM) avec des différences maximales de 13.3 ± 4.8 % et de 13.0 ± 5.3 % entre les joueurs de super rugby comparé aux joueurs de niveau provincial, respectivement pour les avants et les arrières (Smart et al., 2013).

Toutefois il est difficile d'établir une distinction claire entre force maximale horizontale et force maximale verticale car elles semblent liées l'une à l'autre. Par exemple, Cunningham et al, (2013) montrent que la force relative à la masse corporelle en back squat est corrélée au temps sur 10m. Ces résultats sont confirmés par (Seitz et al., 2014) qui montrent aussi des liens entre force du bas du corps dans la composante verticale et performance en sprint.

Figure 5. Différences moyennes (%) de force au back squat (1RM) en fonction du niveau de jeu d'après Smart et al., 2013.



** différence modérée ; *** différence large

4.2.2. Vitesse de course

Comme décrit précédemment, la vitesse est une qualité physique essentielle pour les joueurs de rugby à XV. Les aptitudes des joueurs de rugby à XV concernant les qualités de vitesse ont souvent été étudiées, en particulier au travers de sprints linéaires chronométrés (Crewther et al., 2009, Cross et al., 2015, Posthumus et al., 2020). Une synthèse des performances chronométrées selon l'âge et le poste des rugbymen est présentée dans le tableau ci-dessous.

Table 6. Temps au sprint des joueurs de rugby à XV sur différentes distances en fonction du poste.

Sprint distance	Temps (s) avants	Temps (s) arrières	Différences	Référence
5m	1.29 ± 0.08	1.23 ± 0.05	ND	Cross et al., 2015
	U16 : 1.09 ± 0.11 U18 : 1.07 ± 0.0 U21 : 1.09 ± 0.07	U16 : 1.01 ± 0.05 U18 : 1.05 ± 0.04 U21 : 1.05 ± 0.07	U16 : ES= -0.86 ± 0.68 U18 : NS U21 : NS	Darrall-Jones., 2016
10m	1.78 ± 0.08	1.66 ± 0.04	+ 7.5 ± 2.2% ; ES= 1.99 ± 0.40	Posthumus et al., 2020
	2.04 ± 0.12	1.95 ± 0.04	ND	Cross et al., 2015
	1.85 ± 0.06	1.73 ± 0.07	p <0.001	Crewther et al., 2009
	P: 1.85 s ± 4.7% T: 1.81 s ± 4.1% DL: 1.79 s ± 4.7% TL: 1.76 s ± 4.5%	D : 1.72 s ± 4.0% C : 1.70 s ± 4.0% CP : 1.68 s ± 4.4%	ND	Smart et al., 2013
	1.78 ± 0.09	1.69 ± 0.09	ND	Smart et al., 2014
	U16 : 1.88 ± 0.12 U18 : 1.84 ± 0.06 U21 : 1.82 ± 0.10	U16 : 1.77 ± 0.08 U18 : 1.79 ± 0.06 U21 : 1.76 ± 0.12	U16 : ES= -0.95 ± 0.68 U18 : ES=-0.81 ± 0.83 U21 : ES= -0.52 ± 1.05	Darrall-Jones., 2016
	Pilier gauche : 1.97 ± 0.04 Talonneur : ND Pilier droit : 1.86 ± 0.08 Deuxième ligne : 1.87 ± 0.04 Troisième ligne : 1.84 ± 0.07	Demi de mêlée : 1.74 ± 0.01 Demi d'ouverture : ND Centre : 1.86 ± 0.11 Ailier : 1.85 ± 0.09 Arrière : 1.81 ± 0.04	ND	Fornasier-santos., 2018
20m	3.11 ± 0.15	2.88 ± 0.07	8.0 ± 2.5% ; ES= 1.90 ± 0.39	Posthumus et al., 2020
	3.33 ± 0.15	3.19 ± 0.06	ND	Cross et al., 2015

	3.16 ± 0.10	2.96 ± 0.09	p <0.001	Crewther et al., 2009
	P: 3.21 s ± 4.4% T: 3.14 s ± 4.7% DL: 3.13 s ± 4.2% TL: 3.06 s ± 4.4%	D : 2.96 s ± 3.5% C : 2.95 s ± 4.6% CP : 2.89 s ± 3.3%	ND	Smart et al., 2013
	3.07 ± 0.14	ND	ND	Smart et al., 2014
	U16 : 3.21 ± 0.18 U18 : 3.14 ± 0.10 U21 : 3.12 ± 0.11	U16 : 2.99 ± 0.15 U18 : 3.02 ± 0.10 U21 : 3.02 ± 0.15	U16 : ES= -1.27 ± 0.63 U18 : ES= -1.14 ± 0.82 U21 : ES= -0.69 ± 1.05	Darrall-Jones., 2016
	3.21 ± 0.14	3.01 ± 0.06	P<0.05, ES : ND	Vachon et al., 2021
30m	ND	4.32 ± 0.09	ND	Cross et al., 2015
	ND	D : 4.14 s ± 4.1% C : 4.12 s ± 4.2% CP : 4.11 s ± 3.9%	ND	Smart et al., 2013
	ND	4.04 ± 0.14	ND	Smart et., 2014
	Pilier gauche : 4.83 ± 0.20 Talonneur : ND Pilier droit : 4.31 ± 0.06 Deuxième ligne : 4.41 ± 0.16 Troisième ligne : 4.40 ± 0.22	Demi de mêlée : 4.21 ± 0.05 Demi d'ouverture : ND Centre : 4.42 ± 0.14 Ailier : 4.44 ± 0.09 Arrière : 4.24 ± 0.08	ND	Fornasier-santos., 2018
40m	U16 : 5.87 ± 0.30 U18 : 5.63 ± 0.21 U21 : 5.52 ± 0.17	U16 : 5.45 ± 0.31 U18 : 5.34 ± 0.17 U21 : 5.32 ± 0.22	U16 : ES= -1.36 ± 0.68 U18 : ES= -1.38 ± 0.81 U21 : ES= -0.89 ± 1.05	Darrall-Jones., 2016

P, pilier ; T, talonneur ; DL, deuxième ligne ; TL, troisième ligne ; D, demis ; C, centre ; CP, champ profond. ND, non disponible

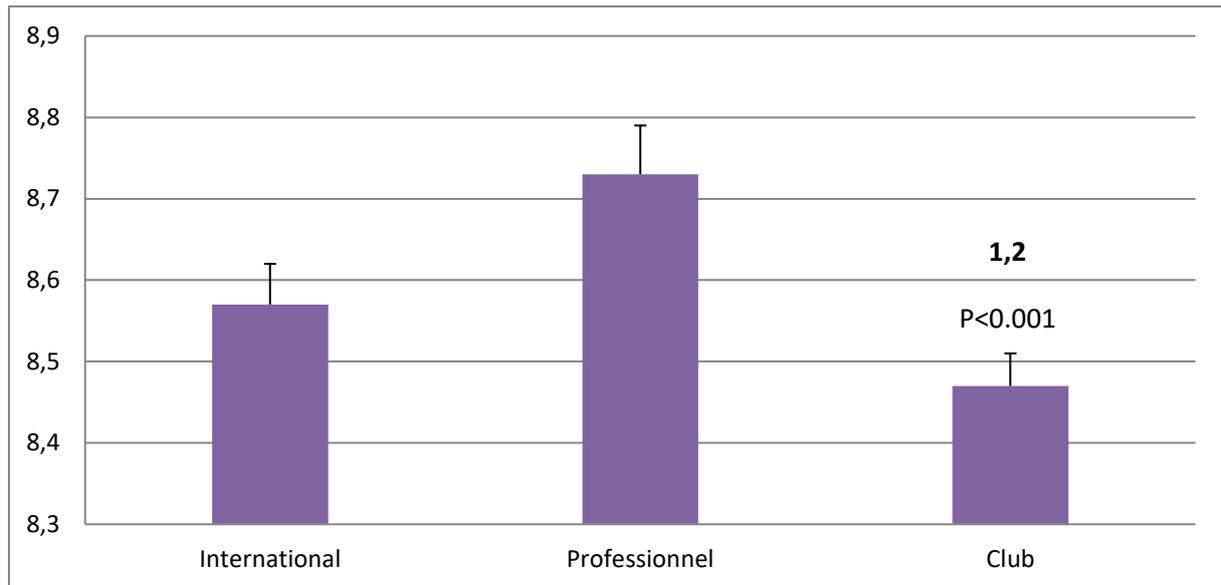
D'après ce tableau de synthèse, on observe des performances au sprint nettement supérieures chez les arrières par rapport aux avants. Quelle que soit la distance de sprint, les différences entre les deux groupes de postes sont larges. Ces aptitudes découlent directement des exigences du jeu, où les arrières sont davantage contraints par les courses à haute vitesse que les avants. D'autre part, il a été rapporté que les qualités de vitesse étaient corrélées au niveau de compétition des joueurs. En effet, les différences de temps sur un sprint 10m vont jusqu'à $-2.1 \pm 2.3\%$ entre les avants internationaux et du niveau provincial et jusqu'à $-3.7 \pm 1.4\%$ chez les arrières évoluant en super rugby comparé à ceux évoluant en provincial (Smart et al., 2013). Par ailleurs, les aptitudes de vitesse peuvent être également déterminées grâce à la mesure de la vitesse maximale atteinte lors du test de sprint. Ainsi, dans une étude qui mesurait les données cinétiques et cinématiques de joueurs de rugby à XV au cours d'un sprint de 30m, les auteurs rapportent que les joueurs du cinq de devant atteignent des vitesses maximales significativement plus faibles ($8.02 \pm 0.04 \text{ m.s}^{-1}$) à celle des autres joueurs alors que les troisièmes lignes ($8.51 \pm 0.06 \text{ m.s}^{-1}$) sont significativement plus lents que les centres ($8.82 \pm 0.08 \text{ m.s}^{-1}$) et les joueurs du champ profond ($8.97 \pm 0.07 \text{ m.s}^{-1}$) confirmant à nouveau les différences de vitesse maximale entre les avants et les arrières (Watkins et al., 2021).

Cette qualité de vitesse maximale linéaire semble différer lorsque le niveau de compétition change ; ainsi il a été démontré que les joueurs internationaux et professionnels atteignaient une vitesse maximale supérieure à celle des joueurs de clubs (Watkins et al., 2021).

La capacité à produire des vitesses de course élevées, mais aussi des changements de vitesse (c'est-à-dire les accélérations/décélérations), quelle que soit la position du joueur, est un facteur clé de la performance en rugby à XV (Cunniffe et al., 2009, Quarrie et al, 2013). En effet, la performance lors d'un sprint de courte distance (10 m) est associée au nombre de breaks (franchissement de la ligne défensive) et de plaquages cassés chez les joueurs de rugby à XV (Smart et al., 2014). Ces résultats sont confirmés plus tard par les études de Den Hollander et al. (2016), dans laquelle la vitesse du porteur de balle est associée au nombre de franchissements alors que les capacités propulsives des appuis du porteur de balle augmentent la probabilité de rupture du plaquage chez les joueurs internationaux comme chez les joueurs de rugby à XV de championnat (Hendricks et al., 2018). Dans leur étude, (Coghetto et al., 2023)

observent également une corrélation entre le taux de duels offensifs remportés et les performances sur un sprint de 30m.

Figure 6. Vitesse maximale atteinte ($m.s^{-1}$) lors d'un sprint de 30m en fonction du niveau de compétition des joueurs de rugby à XV d'après Watkins et al., 2021.

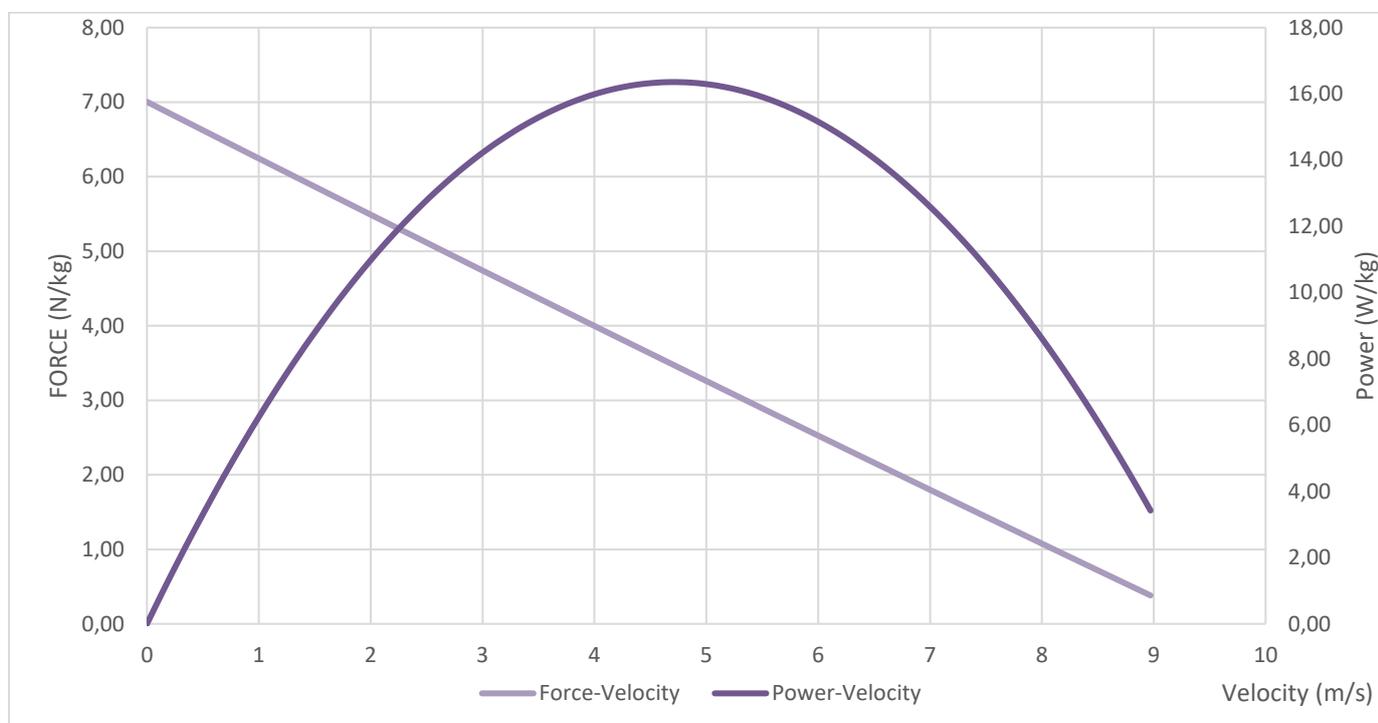


1, significativement différent du niveau international ; 2, significativement différent du niveau professionnel

4.2.3. Puissance maximale

La puissance musculaire correspond au produit de force exercée lors d'un mouvement par la vitesse de ce mouvement. La puissance maximale (P_{max}) est définie comme le produit optimal de la force et de la vitesse d'un athlète. Pour chaque individu, et selon le type de mouvement étudié, la P_{max} s'exprime différemment selon les conditions de force et de vitesse (Figure 7).

Figure 7. Relations force-vitesse et puissance-vitesse mesurée lors d'un sprint de 30m.



En sport collectifs, les méthodes d'évaluation les plus utilisées de la puissance musculaire du bas du corps sont le saut vertical et le saut horizontal lorsque, pour le haut du corps, le développé couché avec projection de barre reste le test le plus utilisé en rugby à XV (Jones et al., 2016). Récemment, de nouvelles méthodes permettent d'évaluer cette qualité physique à l'entraînement. Premièrement, l'utilisation d'accéléromètres ou de transducteurs de position linéaire permettent de quantifier les vitesses de barre et de déterminer la puissance du mouvement instantanément en salle de musculation. Cette méthode est communément appelée le Velocity Based Training (*i.e.*, VBT) et les technologies utilisées dans cette méthode sont considérées comme valides et reproductibles (Martínez-Cava et al., 2020) bien que la précision des mesures puisse varier en fonction des outils et que les transducteurs de position linéaires proposent davantage de fiabilité.

La puissance mécanique développée lors d'un sprint est aussi facilement évaluable (Samozino et al., 2016) et est désormais aussi utilisée chez les joueurs de rugby à XV (Cross et al., 2015).

Ajoutées aux méthodes d'évaluation des qualités de force-vitesse-puissance traditionnelles, ces deux méthodes récentes élargissent le champ des mouvements pour lesquels ces aspects mécaniques sont facilement quantifiables permettant ainsi d'évaluer la puissance développée sur le plan vertical (en saut par exemple) et horizontal (en sprint par exemple). Une synthèse des niveaux de puissance maximale des joueurs de rugby est présentée dans les tableaux 7 et 8.

Les mesures les plus couramment utilisées pour déterminer la puissance musculaire du bas du corps dans le rugby sont la puissance maximale lors de sauts (SJ, CMJ) à poids de corps ou avec charge additionnelle (Table 7) bien que la pertinence des mesures soit controversée (Tessier et al. 2013). D'après le tableau 7, on observe que la puissance maximale semble être influencée par le poste de jeu, les avants produisant une puissance maximale absolue significativement supérieure à celle des arrières lors des sauts à poids de corps et avec charge additionnelle. Le développé couché avec projection de barre est quant à lui, souvent utilisé pour évaluer la puissance du haut du corps. Des résultats similaires ont été observés pour la puissance maximale du haut du corps avec des avants qui produisaient une puissance maximale supérieure à celle des arrières en développé couché avec projection de barre (Table 8). Cependant, lorsqu'on considère la puissance maximale relativement à la masse corporelle, les différences entre avants et arrières disparaissent (Crewther et al., 2009, Posthumus et al., 2020) voire changent en faveur des arrières (Comfort et al., 2011). Il est intéressant de noter que la puissance maximale en rugby semble également être corrélée au niveau de compétition (Argus et al., 2012).

Table 7. Synthèse des caractéristiques de puissance du bas du corps chez les joueurs de rugby

Référence	Rugby code	Tests utilisé	Performance avant	Performance arrière	Différences
Posthumus et al., 2020	Rugby à XV	CMJ à PDC CMJ + 40 kg	<i>Pmax absolue</i> : 5151.8 ± 620.5 W	<i>Pmax absolue</i> : 4512.1 ± 451.9 W	P<0.05 ; ES= 1.15 ± 0.35
			<i>Pmax relative</i> : 44.7 ± 7.8 W.kg ⁻¹	<i>Pmax relative</i> : 47.4 ± 6.3 W.kg ⁻¹	NS ; ES= -0.38 ± 0.33
			<i>Pmax absolue</i> : 4756.5 ± 549.7 W	<i>Pmax absolue</i> : 4298.7 ± 285.4 W	P<0.05 ; ES= 0.99 ± 0.34
			<i>Pmax relative</i> : 41.3 ± 6.8 W.kg ⁻¹	<i>Pmax relative</i> : 45.2 ± 5.3 W.kg ⁻¹	NS ; ES= -0.64 ± 0.33
Comfort et al., 2011	Rugby à XII	SJ + 40kg	<i>Pmax absolue</i> : 2016 ± 421 W <i>Pmax relative</i> : 19.91 ± 3.91 w.kg ⁻¹	<i>Pmax absolue</i> : 1709 ± 286 W <i>Pmax relative</i> : 20.71 ± 5.15 w.kg ⁻¹	<i>Pmax absolue</i> : p=0.049 <i>Pmax relative</i> : p=0.01
Crewther et al., 2009	Rugby à XV	SJ + 70kg	<i>Pmax absolue</i> : 5753.5 ± 670.9 W	<i>Pmax absolue</i> : 5100.0 ± 501.1 W	P<0.05
			<i>Pmoy absolue</i> : 2609.2 ± 251.9 W	<i>Pmoy absolue</i> : 2121.0 ± 337.3 W	P<0.001
			<i>Pmax relative</i> : 246.4 ± 26.2 W.kg ⁻¹	<i>Pmax relative</i> : 247.6 ± 26.2 W.kg ⁻¹	NS
			<i>Pmoy relative</i> : 111.7 ± 8.9 W.kg ⁻¹	<i>Pmoy relative</i> : 103.1 ± 17.7 W.kg ⁻¹	NS
Argus et al., 2012	Rugby à XV	SJ	Professionnel : 5240 ± 670 W Semi-professionnel : 4880 ± 660 W Académie : 4430 ± 950 W		<i>Professionnel</i> Différences faibles à modérée (7.0± 6.7% à 16.6±9.0%) <i>Semi-professionnel</i> Différence faible (10.3±9.9%)

Cronin et al., 2005	Rugby à XV	SJ	<i>Pmax absolue</i> Groupe rapide sur 5m : 2227 W Groupe lent sur 5m : 2144W <i>Pmax relative</i> Groupe rapide sur 5m : 22.4 W.kg ⁻¹ Groupe lent sur 5m : 21.4 W.kg ⁻¹		NS ; t-test=0.93 P=0.05, t-test=2.08
Cross et al., 2015	Rugby à XV et rugby à XIII	Sprint 30m	<i>Pmax relative :</i> Rugby à XV : 18.3± 3.0 W.kg ⁻¹ Rugby à XIII : 17.4± 1.7 W.kg ⁻¹	<i>Pmax relative :</i> Rugby à XV : 20.3± 1.0 W.kg ⁻¹ Rugby à XIII : 18.9± 2.2 W.kg ⁻¹	Rugby a XV vs Rugby a XIII ES=0.33, non clair ES=0.77, modéré
De lacey et al., 2014	Rugby à XIII	Sprint 40m	<i>Pmax absolue :</i> 1957 ± 341 W <i>Pmax relative :</i> 18.54 ± 2.94 W.kg ⁻¹	<i>Pmax absolue :</i> 2220 ± 535W <i>Pmax relative :</i> 23.24 ± 5.98 W.kg ⁻¹	NS ; ES=0.60 P<0.05 ; ES= 1.04
Watkins et al., 2021	Rugby à XV	Sprint 30m	<i>Pmax absolue:</i> CD: 1880 ± 46 W TL: 2088 ± 65 W <i>Pmax relative:</i> CD: 16.2 ± 0.4 W.kg ⁻¹ TL: 19.2 ± 0.6 W.kg ⁻¹	<i>Pmax absolue:</i> D: 1717 ± 72 W C: 1887 ± 81 W CP: 1919 ± 73 W <i>Pmax relative:</i> D: 19.4 ± 0.6 W.kg ⁻¹ C: 19.2 ± 0.7 W.kg ⁻¹ CP : 19.7 ± 0.7 W.kg ⁻¹	<i>Pmax absolue</i> TL>CD et D, p<0.05 D<TL et CP, p<0.05 <i>Pmax relative</i> CD<TL, D, C et CP, p<0.05
Lahti et al., 2020	Rugby à XV	Sprint 30m	Groupe sprint assisté : 16.1± 1.15 W.kg ⁻¹ Groupe sprint résisté : 16.1± 1.50 W.kg ⁻¹		ND
Reyes et al., 2018	Rugby à VII	Sprint 40m	21.20 ± 1.78 W.kg ⁻¹		ND

Pmax, puissance maximale ; *Pmoy*, puissance moyenne ; CD, cinq de devant ; TL, troisième ligne ; D, demis ; C, centre ; CP, champ profond ; ND, non disponible ; NS, non significatif.

Table 8. Synthèse des caractéristiques de puissance du haut du corps chez les joueurs de rugby

Référence	Rugby code	Tests utilisé	Performance avant	Performance arrière	Différences
Crewther et al., 2009	Rugby à XV	Développé couché avec projection de barre	<i>Pmax absolue</i> : 1287.4 ±192.5W <i>Pmoy absolue</i> : 720.9 ± 104.9 W <i>Pmax relative</i> : 55.1 ±8.0 W.kg ⁻¹ <i>Pmoy relative</i> : 30.9 ± 4.6 W.kg ⁻¹	<i>Pmax absolue</i> : 1207.9 ± 202.6 W <i>Pmoy absolue</i> : 646.0 ± 66.3 W <i>Pmax relative</i> : 58.2 ±8.4 W.kg ⁻¹ <i>Pmoy relative</i> : 31.2 ± 2.9 W.kg ⁻¹	NS P<0.05 NS NS
Mac master et al., 2016	Rugby à XV	Développé couché avec projection de barre en contre mouvement et	<i>Pmax absolue</i> 785 ± 129 W <i>Pmax relative</i> 7.6 ± 1.3 W.kg ⁻¹	<i>Pmax absolue</i> 718 ± 105 W <i>Pmax relative</i> 7.6 ± 1.3 W.kg ⁻¹	<i>Pmax absolue</i> P=0.21, ES=0.64 <i>Pmax relative</i> p=0.31, ES=-0.48
		Développé couché avec projection de barre en concentrique uniquement	<i>Pmax absolue</i> 736 ± 194 W <i>Pmax relative</i> 7.1 ± 1.3 W.kg ⁻¹	<i>Pmax absolue</i> 683 ± 92 W <i>Pmax relative</i> 7.7 ± 0.9 W.kg ⁻¹	<i>Pmax absolue</i> P=0.43, ES=0.57 <i>Pmax relative</i> p=0.24, ES=-0.64
Argus et al., 2012	Rugby à XIII	Développé couché avec projection de barre	Professionnel : 1140 ± 220 W Semi-professionnel : 880 ± 90 W Académie : 800 ± 110 W Ecole : 560 ± 140 W		<i>Professionnel</i> Différences larges à très large (21.2± 6.9% à 51.3 ±11.7%) <i>Semi-professionnel</i> Différences modérées à très large (9.9 ±6.5% à 37.3±9.9 %) Académie : différence large (31.5%±11.5)

ND, non disponible ; NS, non significatif

Concernant la puissance développée lors d'un sprint en ligne droite, on observe également que les avants atteignent des niveaux de puissance maximale absolue en sprint légèrement supérieurs à celle des arrières (Watkins et al., 2021), bien que ces différences ne se retrouvent pas dans la totalité des études présentées (Table 7). A l'inverse, lorsqu'on mesure la puissance maximale relative à la masse corporelle du joueur, on observe consensuellement que les arrières ont une performance nettement supérieure à celle des avants avec notamment le 5 de devant qui produit une puissance maximale relative en sprint significativement inférieure à celle de tous les autres postes (Watkins et al., 2021).

En rugby à XV, la puissance maximale est considérée comme un facteur déterminant de la performance. Dans une étude qui explorait les relations entre certaines qualités physiques et des indicateurs clés de la performance en match chez 29 joueurs de rugby à XV internationaux, Cunningham et al. (2018), rapportent que chez les avants, la puissance maximale absolue développée en CMJ est significativement associée au nombre de contacts dominants ($R=0.60$) alors que cette puissance rapportée à la masse corporelle est corrélée au nombre de franchissements ($R=0.549$), au nombre de duels offensifs permettant de gagner la ligne d'avantage ($R=0.654$) et au nombre de rucks efficaces ($R=0.621$). Par ailleurs chez les arrières, les auteurs montrent une relation significative entre la puissance maximale développée au CMJ unilatéral et le nombre de duels offensifs engagés ($R=0.556$). Ces résultats confirment des études réalisées en rugby à XIII dans lesquelles la performance en saut vertical est significativement supérieure chez les joueurs titulaires comparé aux joueurs non sélectionnés pour la compétition (Gabbett et al., 2011b). De plus, la puissance musculaire estimée sur un saut vertical est corrélée au nombre de défenseurs battus (Gabbett et al., 2007) et à l'efficacité technique du plaquage (Gabbett et al., 2011a) des joueurs de rugby à XIII. Par ailleurs, la puissance maximale relative en saut est associée à la performance au 10m en sprint (Wang et al. 2016, Cunningham et al., 2013) qui est un facteur déterminant de la capacité du porteur de balle à casser des plaquages et à franchir la ligne défensive (Smart et al., 2014, den hollander., 2016).

L'explosivité, qui témoigne de la capacité d'un athlète à produire le plus haut niveau de force possible dans le temps le plus court possible (et correspond donc au niveau de puissance exprimable dans les premières millisecondes d'un effort), est également considérée comme un facteur de performance en rugby à XV. Elle peut s'évaluer de

différentes façons, notamment en mesurant la cinétique d'évolution de la force (rate of force développement (RFD)). Le RFD est calculé comme le rapport entre la force produite et le temps écoulé : $RFD = \frac{\Delta Force}{\Delta Temps}$. De façon générale, on mesure ce facteur de performance entre 0 et 250 ms. En Rugby à XV, le RFD mesuré sur un Isometric mid tigh pull (IMTP) est corrélé à la performance en squat 1RM (R allant de 0.595 à 0.748 pour IMTP de 90 ms à 250 ms), alors que le RFD pic est associé au temps de sprint sur 5m ($r = -0.539$) et au temps sur un T-test ($r = -0,523$) (Wang et al., 2016). Ces résultats indiquent que le RFD mesuré sur un IMTP est significativement associé à la force, à l'agilité et aux capacités d'accélération en sprint (Wang et al., 2016). Dans d'autres études, on retrouve des relations indirectes entre les aptitudes d'explosivité des joueurs de rugby et des facteurs de performance en match. Par exemple, (Coghetto et al., 2023) ont montré des associations entre la réussite dans les duels offensifs était corrélée et à une plus grande distance de saut en Broad jump, elle-même dépendant de l'explosivité.

4.2.4. La relation Force-vitesse :

4.2.4.1. Quelques bases théoriques

La relation entre la force qu'un individu peut développer selon la vitesse à laquelle il peut la développer est étudiée depuis de nombreuses années dans les sports individuels et collectifs, et est communément appelée la relation force-vitesse (FV). Elle permet d'analyser le profil biomécanique des athlètes pour un effort donné en identifiant le niveau de force produit en fonction des conditions de vitesses et réciproquement. La force maximale produite dépend de la vitesse à laquelle cette force est générée. La relation force-vitesse permet de comprendre les limites mécaniques qui influencent la production de force. Chez l'Homme, plus la vitesse de contraction musculaire est importante, moins la force produite est élevée.

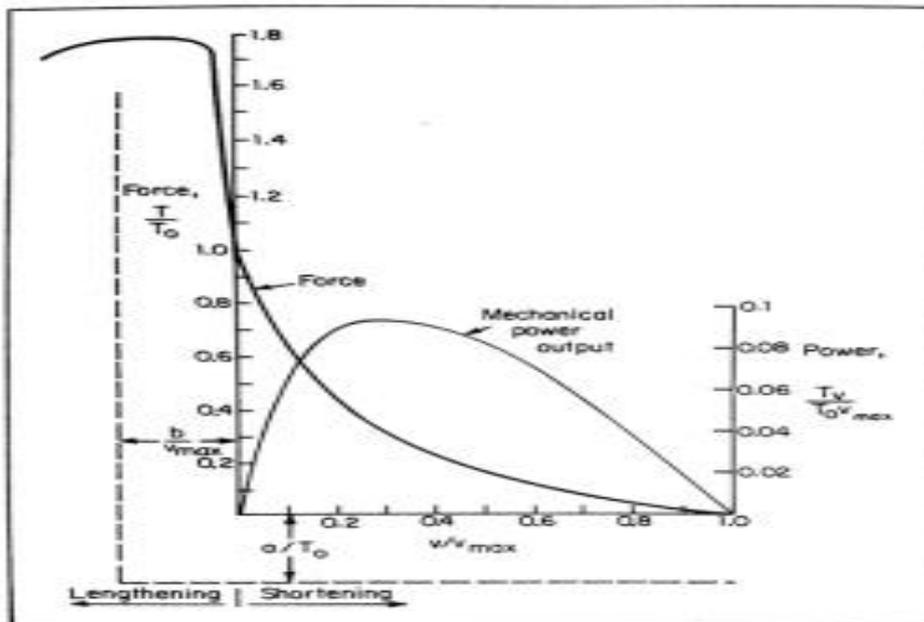
Les premières traces de l'étude de cette relation datent du XIXe siècle, où il a été rapporté que la force isométrique était proportionnelle à la longueur du muscle (Weber., 1846). Plus tard, ce concept sera modélisé par une relation exponentielle entre la force et la vitesse (Hill., 1938). Cette relation hyperbolique montre que la force

maximale produite dépend de la vitesse de contraction musculaire et cette relation reste la plus utilisée encore aujourd'hui.

Equation de Hill (1938) : $(F + a) (v + b) = (F_0 + a) b = (V_0 + b) a$

Avec F la force maximale produite, v la vitesse de raccourcissement de la fibre musculaire, F_0 la force maximale isométrique et V_0 la vitesse théorique sans résistance déduite de $V_0 = \frac{b \times F_0}{a}$, et a et b des constantes qui déterminent les asymptotes de la courbe hyperbolique.

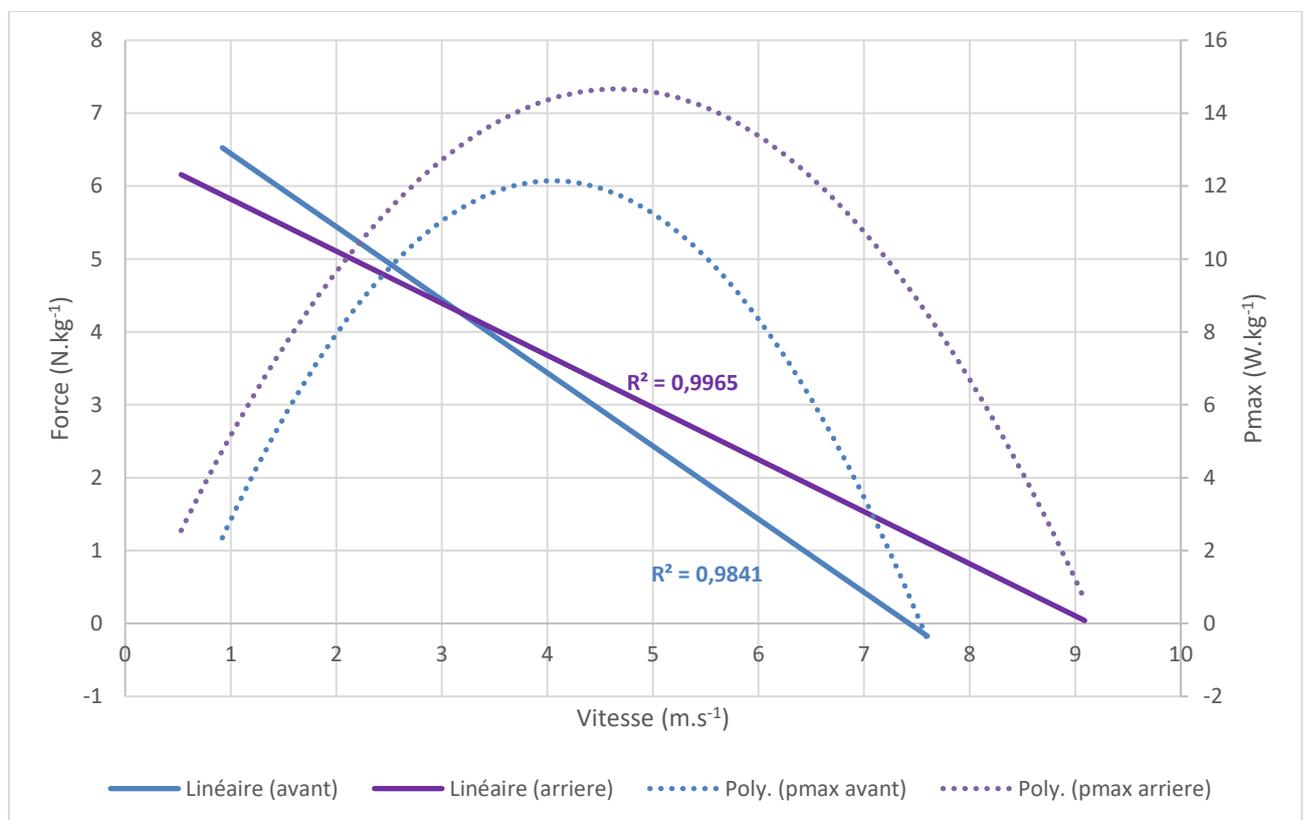
Figure 8. Relation force-vitesse d'après le modèle d'Hill.



Avec T , la force maximale produite ; v , la vitesse de raccourcissement de la fibre musculaire ; a , un constant de force et β , un constant de vitesse. La force, la vitesse et la puissance sont respectivement normalisées par rapport à la force maximale isométrique (T_0), par la vitesse de contraction sans résistance (V_{max}) et par le produit de T_0 et V_{max} respectivement.

Cette relation est très utilisée dans le milieu sportif afin de quantifier les caractéristiques mécaniques des athlètes sur des mouvements mono ou pluri articulaires. La relation FV est aujourd'hui davantage représentée comme une relation linéaire et permet de déterminer par extrapolation F_0 et V_0 qui représentent les capacités maximales théoriques de l'individu.

Figure 9. Relations Force-Vitesse et Puissance-vitesse pour un joueur avant et arrière.



La pente de cette relation (Slope force velocity : Sfv) est utilisée pour déterminer les profils des athlètes. En effet, plus l'athlète produit de hauts niveaux de force dans des conditions de vitesse faible, plus Sfv est négative et l'athlète est qualifié de « force dominant » et réciproquement pour un athlète qualifié de « vitesse dominant ».

4.2.4.2. Relation force-vitesse en sprint

Récemment, l'étude de la relation Force-Vitesse en sprint a été rendue accessible par (Samozino et al., 2016) qui ont mis en place une méthode d'évaluation simple permettant d'obtenir le profil Force-Vitesse et les paramètres de ce profil lors d'un sprint. D'un point de vue théorique, cette méthode analyse la cinématique et la cinétique du centre de masse de l'athlète observé au cours d'un sprint. Ainsi, à partir de la fonction mono exponentielle de la vitesse horizontale $v_H(t) = v_{H_{max}} \cdot (1 - e^{-t/\tau})$ on

$$a_H(t) = \left(\frac{v_{max}}{\tau} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

détermine par dérivation l'accélération horizontale . En appliquant les lois fondamentales de la dynamique dans la direction horizontale, la force de réaction du sol horizontale nette antéro-postérieure (FH) appliquée au centre de

masse est modélisée par $F_H(t) = m \cdot a_H(t) + F_{aero}(t)$. L'efficacité mécanique lors du sprint est également déterminée comme le ratio de la force (RF) horizontale produite sur la force résultante (Morin et al., 2011) et modélisée par

$$RF = \frac{F_H}{F_{Res}} \cdot 100 = \frac{F_H}{\sqrt{F_H^2 + F_V^2}} \cdot 100$$

. RF diminue à mesure que la vitesse augmente au cours du sprint, et le pourcentage de diminution d'orientation de force horizontale est appelé Decrease Rate of Force (DRF). *In fine*, plusieurs paramètres mécaniques sont déterminés comme suit.

Cette méthode est aujourd'hui largement utilisée par les préparateurs physiques et par les chercheurs pour mesurer l'efficacité de leur programme d'entraînement ou leurs protocoles expérimentaux.

Table 9. Variables mécaniques issues de la relation force-vitesse en sprint (Morin et Samozino., 2016).

Variable mécanique	Définition
F_0 (N)	Force horizontale maximale théorique extrapolée de la relation linéaire FV
F_{rel} (N.kg ⁻¹)	Force horizontale maximale théorique extrapolée de la relation linéaire FV divisée par la masse corporelle
V_0 (m.s ⁻¹)	Vitesse maximale théorique extrapolée de la relation linéaire FV
P_{max} (W)	Puissance mécanique maximale produite dans la direction horizontale Calculée par $P_{max} = (F_0 \cdot V_0) / 4$
$P_{max\ rel}$ (W.kg ⁻¹)	Puissance mécanique maximale produite dans la direction horizontale divisée par la masse corporelle
Sfv	Ratio de diminution de la force horizontale avec l'augmentation de la vitesse de course Calculé par $SFV = -F_0/V_0$
RFmax (%)	Ratio de force théorique maximal (RF), calculé comme le rapport entre la composante horizontale de la force de réaction du sol, et la force résultante correspondante.
DRF	Diminution moyenne du RF avec l'augmentation de la vitesse

4.2.4.3. La relation Force-vitesse en rugby

En rugby à XV, les évaluations de la relation Force-Vitesse réalisées dans les études scientifiques montrent des différences de profil entre les avants et arrières. La force

maximale évaluée en développé couché avec projection de barre est de 13 % et 16% supérieure (ES= 1.17 et 1.43) comparé aux arrières pour un développé couché respectivement en contre mouvement et uniquement en concentrique (McMaster et al. 2016). A l'inverse, la vitesse maximale en développé couché en contre mouvement et uniquement en concentrique est respectivement supérieure de 5% et 15% (ES= -0.32 et -0.65) chez les arrières que chez les avants. Ces résultats suggèrent donc que les avants ont un profil « force dominant » comparé aux arrières dont le profil est davantage « vitesse dominant » (McMaster et al. 2016).

En sprint, on retrouve des caractéristiques mécaniques similaires. D'après le tableau 10, qui synthétise les connaissances actuelles concernant la relation force-vitesse en rugby, on remarque que les avants ont une F_0 supérieure à celle des arrières. *A contrario*, les V_0 calculées sont significativement supérieure chez les arrières comparés aux avants. Concernant les capacités d'orientation de la force en sprint, bien que le nombre de données soit limité dans la littérature, les premières et secondes lignes semblent avoir une capacité d'orientation maximale de la force sur le plan horizontal (RFmax) significativement inférieure au reste de l'équipe (Watkins et al., 2021). De plus, ces différences d'orientation de force dans le plan horizontal augmentent entre avants et arrières à mesure que la vitesse augmente (Watkins et al., 2021). Il en résulte une différence significative de Sfv entre les avants et les arrières avec les avants dans un profil « force dominant » et les arrières dans un profil « vitesse dominant ». Ces résultats correspondent aux exigences physiques associées aux particularités du poste avec les avants davantage impliqués dans des activités statiques à haut niveau de force et des arrières plus concernés par les courses à haute vitesse (Cunniffe et al., 2009, Cahill et al., 2013).

Table 10. Synthèse des connaissances des données force vitesse en sprint en rugby

Variable mécanique	Avants	Arrières	Différences	Référence	Rugby code
F ₀	<p><i>Absolue</i> CD : 918.6 ± 22.0 N TL : 955.7 ± 31.4 N <i>Relative</i> CD: 7.89 ± 0.19 N.kg⁻¹ TL: 8.80 ± 0.27 N.kg⁻¹</p>	<p><i>Absolue</i> D : 771.3 ± 34.3 N C : 833.2 ± 38.6 N CP : 831.0 ± 34.9 N <i>Relative</i> D : 8.71 ± 0.30 N.kg⁻¹ C : 8.47 ± 0.34 N.kg⁻¹ CP : 8.53 ± 0.30 N.kg⁻¹</p>	<p><i>Absolue</i> CD > D et CP, p < 0.05 TL > D, C et CP, p < 0.05 <i>Relative</i> CD < TL et D, p < 0.05</p>	Watkins et al., 2021	Rugby à XV
	<p><i>Absolue</i> Pilier gauche : 785.3 ± 205 N Talonneur : ND Pilier droit : 944 ± 21 N Deuxième ligne : 900 ± 63 N Troisième ligne : 882 ± 153 N <i>Relative</i> Pilier gauche : 6.6 ± 1.4 N.kg⁻¹ Talonneur : ND Pilier droit : 7.7 ± 0.5 N.kg⁻¹ Deuxième ligne : 7.7 ± 0.7 N.kg⁻¹ Troisième ligne : 8.1 ± 1.2 N.kg⁻¹</p>	<p><i>Absolue</i> Demi de mêlée : 689 ± 93 N Demi d'ouverture : ND Centre : 825 ± 98 N Ailier : 799 ± 90 N Arrière : 698 ± 104 N <i>Relative</i> Demi de mêlée : 8.8 ± 1.0 N.kg⁻¹ Demi d'ouverture : ND Centre : 7.5 ± 0.8 N.kg⁻¹ Ailier : 8.1 ± 0.0 N.kg⁻¹ Arrière : 7.5 ± 0.8 N.kg⁻¹</p>	ND	Fornasier-santos., 2018	Rugby à XV
	<p><i>Rugby à XV</i> 8.48 ± 1.27 N.kg⁻¹ <i>Rugby à XIII</i> 8.06 ± 0.75 N.kg⁻¹</p>	<p><i>Rugby à XV</i> 8.76 ± 0.41 N.kg⁻¹ <i>Rugby à XIII</i> 8.17 ± 0.99 N.kg⁻¹</p>	<p><i>Rugby à XV vs Rugby à XIII</i> Avants : non clair, ES=0.35</p>	Cross et al., 2015	Rugby à XV et à XIII

Arrières : modérée, ES=0.73					
	8.91 ± 0.80 N.kg ⁻¹		ND	Reyes et al., 2018	Rugby à VII
	Groupe sprint résisté : 7.46 ± 0.73 N.kg ⁻¹ Groupe sprint assisté : 7.46 ± 0.41 N.kg ⁻¹		ND	Lahti et al., 2020	Rugby à XV
V ₀	CD : 8.31 ± 0.06 m.s ⁻¹ TL : 8.73 ± 0.06 m.s ⁻¹	D : 8.89 ± 0.08 m.s ⁻¹ C : 9.09 ± 0.09 m.s ⁻¹ CP : 9.25 ± 0.08 m.s ⁻¹	CD < TL, D, C et CP, p < 0.05 TL < C et CP D < CP	Watkins et al., 2021	Rugby à XV
	Pilier gauche : 7.6 ± 0.5 m.s ⁻¹ Talonneur : ND Pilier droit : 8.1 ± 0.2 m.s ⁻¹ Deuxième ligne : 7.9 ± 0.2 m.s ⁻¹ Troisième ligne : 8.1 ± 0.3 m.s ⁻¹	Demi de mêlée : 8.6 ± 0.3 m.s ⁻¹ Demi d'ouverture : ND Centre : 8.4 ± 0.3 m.s ⁻¹ Ailier : 8.2 ± 0.2 m.s ⁻¹ Arrière : 8.9 ± 0.7 m.s ⁻¹	ND	Fornasier- santos., 2018	Rugby à XV
	Rugby à XV 8.65 ± 0.59 m.s ⁻¹ Rugby à XIII 8.66 ± 0.60 m.s ⁻¹	Rugby à XV 9.28 ± 0.37 m.s ⁻¹ Rugby à XIII 9.27 ± 0.31 m.s ⁻¹	Rugby à XV vs Rugby à XIII Avants : non clair, ES=0.01 Arrières : non clair, ES=0.03	Cross et al., 2015	Rugby à XV et à XIII
	9.61 ± 0.28 m.s ⁻¹		ND	Reyes et al., 2018	Rugby à VII
	Groupe sprint résisté : 8.75 ± 0.47 m.s ⁻¹ Groupe sprint assisté : 8.71 ± 0.50 m.s ⁻¹		ND	Lahti et al., 2020	Rugby à XV

Pmax	<i>Pmax absolue</i> CD: 1880 ± 46 W TL: 2088 ± 65 W <i>Pmax relative</i> CD: 16.2 ± 0.4 W.kg ⁻¹ TL: 19.2 ± 0.6 W.kg ⁻¹	<i>Pmax absolue</i> D: 1717 ± 72 W C: 1887 ± 81 W CP: 1919 ± 73 W <i>Pmax relative</i> D: 19.4 ± 0.6 W.kg ⁻¹ C: 19.2 ± 0.7 W.kg ⁻¹ CP: 19.7 ± 0.7 W.kg ⁻¹	<i>Pmax absolue</i> TL>CD et D, p<0.05 D<TL et CP, p<0.05 <i>Pmax relative</i> CD<TL, D, C et CP, p<0.05	Watkins et al., 2021	Rugby à XV
	<i>Pmax absolue</i> Pilier gauche : 1481 ± 347 W Talonneur : ND Pilier droit : 1909 ± 98 W Deuxième ligne : 1769 ± 134 W Troisième ligne : 1792 ± 322 W <i>Pmax relative</i> Pilier gauche : 12.6 ± 2.5 W.kg ⁻¹ Talonneur : ND Pilier droit : 15.5 ± 0.5 W.kg ⁻¹ Deuxième ligne : 15.1 ± 1.6 W.kg ⁻¹ Troisième ligne : 16.4 ± 2.5 W.kg ⁻¹	<i>Pmax absolue</i> Demi de mêlée : 1484 ± 140 W Demi d'ouverture : ND Centre : 1739 ± 200 W Ailier : 1642 ± 222 W Arrière : 1553 ± 204 W <i>Pmax relative</i> Demi de mêlée : 19.0 ± 1.4 W.kg ⁻¹ Demi d'ouverture : ND Centre : 15.8 ± 2.2 W.kg ⁻¹ Ailier : 16.7 ± 0.4 W.kg ⁻¹ Arrière : 16.7 ± 1.6 W.kg ⁻¹	ND	Fornasier-santos., 2018	Rugby à XV
	21.20 ± 1.78 W.kg ⁻¹		ND	Reyes et al., 201	Rugby à VII
	Groupe sprint assisté : 16.1 ± 1.15 W.kg ⁻¹ Groupe sprint résisté : 16.1 ± 1.50 W.kg ⁻¹		ND	Lahtli et al., 2020	Rugby à XV
	<i>Pmax absolue</i> : 1957 ± 341 W <i>Pmax relative</i> : 18.54 ± 2.94 W.kg ⁻¹	<i>Pmax absolue</i> : 2220 ± 535W <i>Pmax relative</i> : 23.24 ± 5.98 W.kg ⁻¹	NS ; ES=0.60 P<0.05 ; ES= 1.04	De lacey et al., 2014	Rugby à XIII

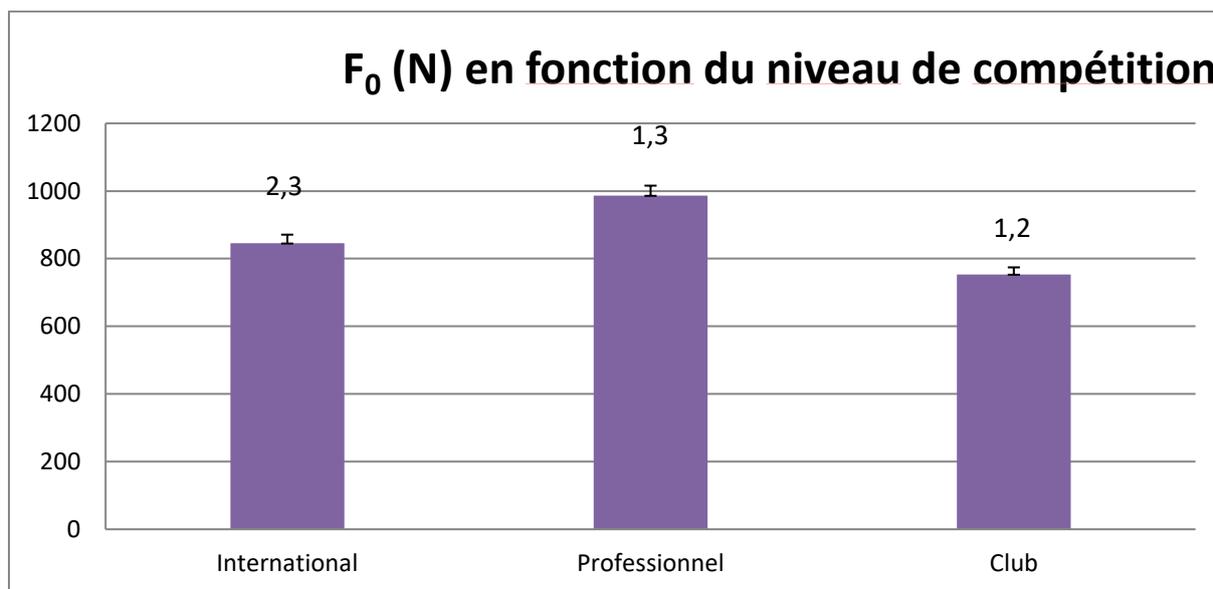
	<i>Pmax relative :</i> Rugby à XV : 18.3± 3.0 W.kg ⁻¹ Rugby à XIII : 17.4± 1.7 W.kg ⁻¹	<i>Pmax relative :</i> Rugby à XV : 20.3± 1.0 W.kg ⁻¹ Rugby à XIII : 18.9± 2.2 W.kg ⁻¹	Rugby a XV vs Rugby a XIII ES=0.33, non clair ES=0.77, modéré	Cross et al., 2015	Rugby à XV et à XIII
RFmax	ND	ND	CD<TL, D, C et CP, p<0.001	Watkins et al., 2021	Rugby à XV
	Pilier gauche : 0.46 ± 0.06 Talonneur : ND Pilier droit : 0.51 ± 0.01 Deuxième ligne : 0.51 ± 0.03 Troisième ligne : 0.52 ± 0.04	Demi de mêlée : 0.56 ± 0.03 Demi d'ouverture : ND Centre : 0.51 ± 0.03 Ailier : ND Arrière : 0.51 ± 0.03	ND	Fornasier-santos., 2018	Rugby à XV
	55.49 ± 2.91 %		ND	Reyes et al., 2018	Rugby à VII
DRF	ND	ND	ND	Watkins et al., 2021	Rugby à XV
	Pilier gauche : -8.4 ± 1.9 Talonneur : ND Pilier droit : -8.9 ± 0.8 Deuxième ligne : -9.2 ± 0.8 Troisième ligne : -9.2 ± 1.2	Demi de mêlée : -9.4 ± 1.4 Demi d'ouverture : ND Centre : -8.3 ± 0.6 Ailier : -9.2 ± 0.8 Arrière : -7.8 ± 1.1	ND	Fornasier-santos., 2018	Rugby à XV
	-0.082 ± 0.0009		ND	Reyes et al., 2018	Rugby à VII
Sfv	CD : -112.6 ± 2.8 TL : -109.5±4.0	D : -86.8±4.3 C : -92.2±4.9 CP : -90.2±4.4	CD> D, C et CP TL> D, C et CP	Watkins et al., 2021	Rugby à XV

Pilier gauche : -104.7 ± 30.7 Talonneur : ND Pilier droit : -116.8 ± 0.9 Deuxième ligne : -114.6 ± 9.0 Troisième ligne : -108.6 ± 18.6	Demi de mêlée : -80.0 ± 14.0 Demi d'ouverture : ND Centre : -98.0 ± 12.8 Ailier : -97.3 ± 8.7 Arrière : -78.8 ± 15.0	ND	Fornasier-santos., 2018	Rugby à XV
Groupe sprint résisté : -0.85 ± 0.08 Groupe sprint assisté : -0.86 ± 0.09		ND	Lahti et al., 2020	Rugby à XV

CD, cinq de devant ; TL, troisième ligne ; D, demis ; C, centre ; CP, champ profond. ND : Non Disponible.

Par ailleurs, la performance mesurée semble être différente selon le niveau de compétition observé avec une F_0 (N) et un RFmax (%) significativement supérieurs ont été mesurés chez les joueurs internationaux et professionnels comparé aux joueurs de club (Watkins et al. 2021).

Figure 10. Force maximale théorique horizontale (F_0 , N) en fonction du niveau de compétition en rugby à XV d'après Watkins et al., 2021.



1, Significativement différent du niveau international ; 2, significativement différent du niveau professionnel ; 3, significativement différent du niveau club pour $p < 0.05$

Toutefois, à notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée aux relations entre les capacités d'application de force horizontale en sprint linéaire et les indicateurs de performance en match. Dans ce contexte, le lien entre performance linéaire et non linéaire en rugby à XV est complètement inconnu. Les seules données disponibles à ce sujet dans la littérature sont présentées de manière indirecte. Par exemple, la performance en poussée de sled lourd sur 5m est corrélée au nombre de contacts dominants chez les avants et de ballon portés (carries), de contacts dominants et de offloads (passe après contact) chez les arrières (Cunningham et al., 2018). Ces relations suggèrent une éventuelle relation entre capacités d'application de force horizontale à basse vitesse (F_0 et RFmax) et des indicateurs de performances lors d'efforts de contact en match.

4.2.5. Capacité à répéter des sprints

Comme décrit précédemment, la capacité à répéter des sprints est une qualité physique fondamentale pour la performance en sport collectif et en particulier en rugby. (Smart et al., 2014, Gabbett et al., 2013). Bien que la RSa ait été beaucoup étudiée, il est difficile de déterminer de façon consensuelle la RSa des joueurs de rugby à XV, principalement en raison des méthodes d'évaluation différentes entre les études. Toutefois, on observe dans la littérature disponible que la RSa des joueurs de rugby est différente selon le poste de jeu et le niveau de compétition (Smart et al., 2013) et peut s'avérer différente entre un joueur titulaire et non sélectionné (Gabbett et al., 2011b). Le tableau 11 présenté ci-dessous renseigne sur les données publiées dans la littérature concernant la RSa en fonction du code de jeu. On n'y observe pas de véritable consensus, le niveau de RSa des avants et des arrières étant variable du fait de l'utilisation de méthodes d'évaluation différentes selon les postes. De plus, bien que les niveaux d'indice de fatigue calculés varient entre 3 et 11% selon les études, il est difficile d'obtenir un consensus scientifique car ces données sont influencées par la méthode de calcul et le format du test (*i.e.*, durée de récupération, durée d'effort et intensité de la récupération). Toutefois, la littérature disponible suggère malgré tout que la RSa est liée au niveau de performance en rugby dans la mesure où un meilleur niveau de RSa est recensé chez les joueurs titulaires ainsi que chez les joueurs avec un haut niveau de condition physique (Table 11).

Table 11. Capacité à répéter des sprints des joueurs de rugby.

Référence	Rugby code	Test	Performance moyenne		Indice de fatigue	
			Avants	Arrières	Avants	Arrières
Smart et al., 2013	Rugby à XV	RS ²	Piliers : 3.44 ± 5.5s Talonneurs : 3.35 ± 4.0s Deuxième ligne : 3.31 ± 4.5s Troisième ligne : 3.23 ± 4.6s	Demis : 4.30 ± 4.0 s Centres : 4.33 ± 4.9 s Champ profond : 4.25 ± 4.0 s	Piliers : 3.9 ± 5.1 % Talonneurs : 4.6 ± 3.9 % Deuxième ligne : 3.0 ± 4.1 % Troisième ligne : 3.8 ± 4.7 %	Demis : 3.1 ± 3.7 % Centres : 4.9 ± 5.1% Champ profond : 4.1 ± 4.6 %
Smart et al., 2014	Rugby à XV	RS ²	3.26 ± 0.20 s	4.27 ± 0.15 s	2.6 ± 4.2 %	2.8 ± 4.0 %
Fornasier santos et al., 2018	Rugby à XV	8x40m départ toutes les 30s	90.5 ± 1.5 % vitesse max		9.8 ± 2.8 sprints >85% vitesse max	
Morel et al., 2015	Rugby à XV	5x 5s de sprint avec 20s de récupération	ND		Décrément EMG : -5.7 ± 3.5 % Vitesse de sprint : -7.3 ± 0.9 %.	
Johnston & gabbett 2011	Rugby à XIII	12x20m départ toutes les 20s	Temps total : 41.9 ± 2.4s		11.4 ± 4.5 %	
Gabbett et al., 2013	Rugby à XIII	12x20m départ toutes les 20s	High fitness: 41.6 ± 1.1s Low fitness: 42.5 ± 0.9s		ND	
Gabbett et al., 2011	Rugby à XIII	12x20m départ toutes les 20s	Titulaires : 38.3+2.8s Remplaçants : 38.9+3.2s Non sélectionnés : 39.1 +3.3s		ND	
Reyes et al., 2019	Rugby à VII	10x40m avec 30s de récupération	Sprint 1: 5.35 ± 0.13s Sprint 2-4: 5.58 ± 0.12s Sprint 5-7: 5.76 ± 0.17s		Sprint 1 vs 2-4 : 4.3 ± 1.0% Sprint 1 vs 5-7 : 7.7 ± 1.3 % Sprint 1 vs 8-10 : 10.3 ± 1.3 %	

		Sprint 8-10 : 5.90 ± 0.21 s
Beard et al., 2022	WAT	Avants : 146.09 ± 5.24 s Arrières : 135.93 ± 2.64 s Total équipe : 141.61 ± 6.65 s

ND, non disponible

4.2.5.1. Evaluation de la RSa

En sport individuel comme en sport collectif, la RSa est une qualité physique importante à déterminer chez les athlètes. Ainsi, plusieurs méthodes d'évaluation ont été proposées dans la littérature scientifique ces dernières décennies, avec notamment des différences dans la durée des sprints, le nombre de répétitions, la nature de l'exercice et la durée de récupération qui influencent très clairement les mesures de la RSa (Spencer et al., 2005). D'après ces derniers auteurs, le temps de sprint varie entre 2.5 s à 10 s avec une majorité d'études qui utilisent des durées de sprint de 5 à 6 s. Le nombre de répétitions de sprint utilisé est également très différent en fonction des études avec une large gamme comprise entre 4 et 40 sprints bien que la majorité des études adoptent un nombre de répétition compris entre 5 et 15 sprints. Les conditions de récupération sont également très variables, avec des durées de 20 s à 50s et des intensités allant de la récupération passive au jogging. Enfin, la nature des efforts pratiqués peut être dissociée en deux catégories, (i) les sprints courus (avec ou sans tapis de course), et (ii) les sprints sur cycle.

Bien qu'une grande partie des tests utilisés en rugby à XV correspondent à la description précédente, on retrouve également des tests spécifiques pour évaluer la RSa des joueurs. Ces méthodes d'évaluation de la RSa utilisées en rugby sont décrites dans le tableau 12.

Table 12. Méthodes d'évaluation de la RSa utilisées en rugby.

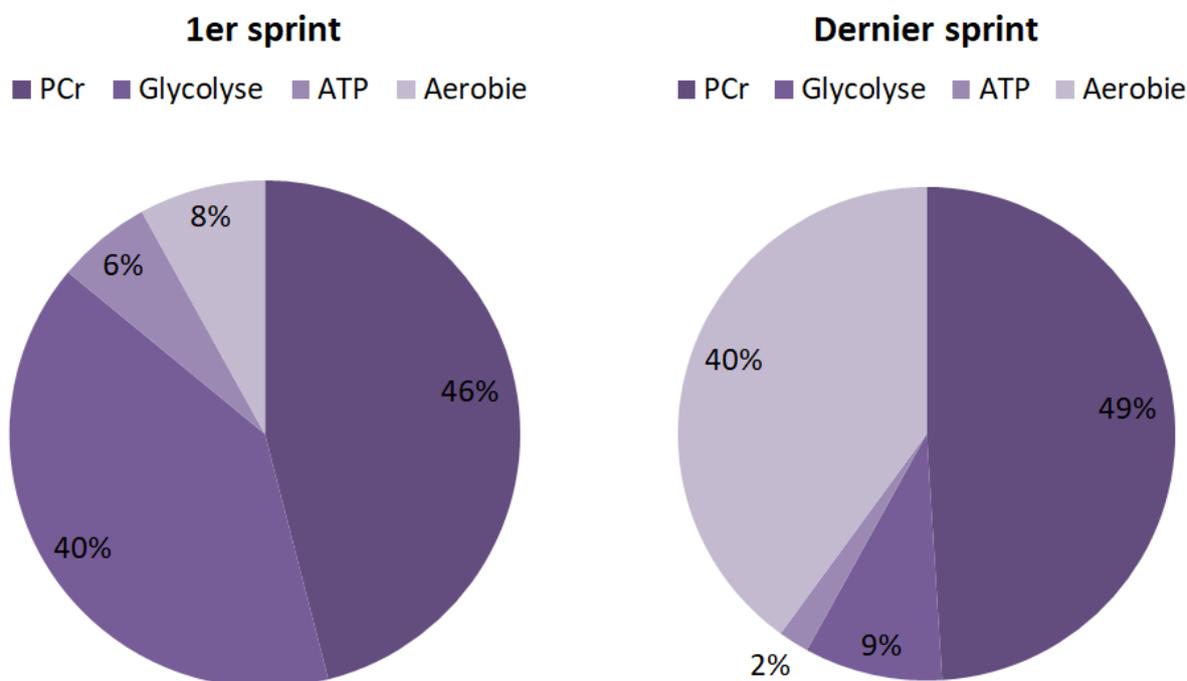
Référence	Nature de l'effort	Distance de sprint	Durée du sprint	Nombre de répétition	Durée de la récupération	Intensité de la récupération	Description complémentaire du test
Johnston & gabbett 2011 Gabbett et al., 2011 Gabbett et al., 2013	Course à pied	20m	ND	12	Cycle de 20s	Marche (10m)	
Smart et al., 2013 Smart et al., 2014	Course à pied alternée avec effort spécifique	Avants : 20m Arrières : 30m	ND	Avants : 3x4 sprints Arrières : 3x3 sprints	Avants : Cycle de 30s Arrières : 40s cycle	Avants : Jogging (10m) Marche (20m) Arrières : Jogging (15m) Marche (30m)	Avants : 3x 4 sprints de 20m alternés avec 2x 5 efforts de 20m avec powerbag et passage au sol Arrières : 3x 3 sprints de 30m alternés avec 2x 4 efforts de 20m avec powerbag et passage au sol
Morel et al., 2015	Course à pied	ND	5s	5	20s	Passive	
Fornasier santos et al., 2018	Course à pied en ligne droite	40m	ND	8	Cycle de 30s	Passive	
Reyes et al., 2019	Course à pied en ligne droite	40m	ND	10	Cycle de 30s	Passive	
Beard et al., 2022	Course à pied avec changement de direction	50m	10 à 15s	10	Cycle de 40s	Passive	10 répétitions d'un parcours de 50m de sprint avec passage au sol et changement de direction

ND, non disponible

4.2.5.2. Aspects énergétiques des RSE

Pendant les sprints maximaux de courte durée constituant un RSE, la production d'ATP est maintenue grâce à divers processus métaboliques. Ces derniers fonctionnent ensemble pour atteindre des taux de renouvellement de l'ATP d'environ 15 mmol ATP/kg dm/sec (Glaister., 2005). Cependant, comme dans les sports collectifs ces efforts sont souvent répétés, la réponse métabolique et les contributions énergétiques peuvent évoluer au cours du temps en fonction du nombre de sprints et de la durée de la récupération (Balsom et al., 1992, Billat., 2001). Lors d'une série de six sprints de 6 secondes avec 30 secondes de récupération entre chaque sprint, alors que la production de puissance produite lors du premier sprint est permise par une contribution énergétique provenant de la dégradation de la phosphocréatine (PCr) (46%) et de la glycolyse anaérobie (40%), celle du dixième sprint provient beaucoup plus de la filière aérobie (40% de la fourniture énergétique totale) au détriment de la glycolyse anaérobie (9%) (Spencer et al. 2005), (Glaister., 2005) et (Billat., 2001).

Figure 11. Contribution énergétique lors du premier sprint et du dernier sprint d'un effort de sprint répété. D'après Girard et al., 2011.



4.2.5.3. Déterminants de la performance lors d'un RSE

La RSa dépend premièrement de la performance en sprint de l'athlète, et deuxièmement de sa capacité à récupérer entre les efforts.

4.2.5.3.1. *Performance en sprint*

La qualité de sprint d'un joueur a une incidence déterminante sur le niveau de RSa. Dans leur étude qui s'intéressait aux associations entre performance lors d'un test RSa et les capacités physiques de sportifs, (Buchheit., 2012) rapporte que le temps moyen des sprints (RSmean) est presque parfaitement corrélé avec le temps du meilleur sprint (RSbest). La vitesse maximale semble être le meilleur prédicteur du temps réalisé au test de RSa (Rossignol et al., 2014), la performance RSa étant significativement corrélée aux performances au sprint de 30m ($r = 0,64$, $P < 0,01$) et de 20 à 40 m ($r = 0,78$, $P < 0,01$). Ces résultats suggèrent donc que la performance au test RSa peut être augmentée par l'amélioration de facteurs mécaniques sans forcément modifier la capacité des joueurs à récupérer entre les efforts (Bravo et al., 2008). Ces performances mécaniques de sprint sont déterminées à la fois par la maximisation des capacités de production de puissance horizontale et l'optimisation de l'application des forces propulsives dans différentes conditions de vitesse (Morin et al., 2012, Samozino et al., 2022). Toutefois, il a été démontré que les sujets ayant la meilleure performance au premier sprint sont également ceux qui obtiennent les plus hauts décrets de performance en raison de leur plus haute déplétion des stocks de PCR lors de sprints répétés (Bishop et al., 2003).

4.2.5.3.2. *Récupération entre les sprints et Facteurs de fatigue en RSE*

Les sprints répétés vont engendrer une fatigue inévitable de l'athlète qui va entraver sa capacité à réitérer sa meilleure performance. Cette fatigue peut se caractériser par des phénomènes d'ordre périphériques (notamment métaboliques) et nerveux (fatigue centrale).

4.2.5.3.3. *Facteurs métaboliques*

-Déplétion des stocks

Le premier facteur de fatigue métabolique lors d'un RSE est relatif à la déplétion des stocks énergétiques. Dans une étude qui examinait les contributions énergétiques lors de deux sprints sur ergocycle espacés de 4 min, les auteurs rapportent que le renouvellement de l'ATP par voie anaérobie, calculé à partir des variations de l'ATP, de la PCR et du lactate, représente 235 mmol.kg^{-1} de muscle sec durant le premier sprint et chutait à 139 mmol.kg^{-1} lors du second, représentant une diminution de 45% de la glycolyse (Bogdanis et al., 1996). Toutefois, les auteurs n'ont observé qu'une baisse de performance de -18% lors du second sprint de 30 secondes, ce qui montrait déjà la compensation du métabolisme aérobie et représentait 49% de la contribution énergétique totale lors du second sprint. Ainsi, la déplétion de la PCR peut impacter les stocks à hauteur de 40% des valeurs de repos contre 70% des valeurs de repos pour l'ATP. Comme la concentration en PCR est étroitement liée au maintien des performances (McMahon et Jenkins., 2002, Mendez-Villanueva et al., 2008), ces déplétions importantes nécessitent des taux de resynthèse élevés qui vont dépendre de la durée et de l'intensité de la récupération (Spencer et al., 2005; Balsom et al., 1992), de l'ampleur de la déplétion (Dawson et al., 1997) et du niveau d'entraînement des athlètes (Bishop et Edge., 2006). L'augmentation de la contribution du système aérobie (*vide infra*) permet la resynthèse de la PCR, support énergétique principal dans la rephosphorylation de l'ADP.

-Acidose

Pendant un RSE, une accumulation considérable d'ions hydrogène (H^+) dans les muscles (Bishop et Edge., 2006) et dans le sang (Bishop et al., 2003) se produit. Ce phénomène est nommé « acidose » et entraîne une diminution du pH musculaire, ce qui affecte la performance en répétition de sprint. En effet, l'acidification du milieu musculaire entraîne des perturbations au niveau des structures contractiles (réduction de la captation du Ca^{2+} par le réticulum sarcoplasmique, de l'affinité Ca^{2+} /troponine) ce qui a pour incidence de limiter la contractilité musculaire (McMahon et Jenkins., 2002). De plus, l'acidose inhibe les enzymes phosphofructokinase et phosphorylase ce qui réduit la production d'ATP issu de la glycolyse (Bishop et al., 2011). Toutefois, les effets de l'acidose peuvent être limités par les capacités tampons de l'athlète. En effet, (Thomas et al., 2005) ont étudié les contenus musculaires des transporteurs de monocarboxylates (MCT) 1 et 4 (qui contribuent à cet effet tampon) et leurs relations

liées à l'élimination du lactate sanguin après un exercice supramaximal répété (*i.e.*, 10 sprints sur bicyclette ergométrique de 10 secondes entrecoupés de 30 secondes de récupération). Les auteurs ont rapporté que le contenu musculaire en MCT1 était inversement corrélé à l'indice de fatigue lors des sprints répétés ($r = -0.58$, $P < 0.05$). Ces transporteurs MCT facilitent le processus d'élimination du lactate et des ions hydrogènes intramusculaire et sont déterminants de la RSa (Bishop et al., 2004, Edge et al., 2006).

-Perturbations ioniques

A la suite de contractions musculaires intenses, des perturbations ioniques marquées sont observées (modification de la polarisation sodium :Na⁺/potassium :K⁺) ; il est donc cohérent de penser que ces perturbations ioniques pourraient jouer un rôle dans l'apparition de la fatigue lors de sprints répétés du fait qu'elles altèrent l'excitabilité de la membrane cellulaire et impactent ainsi la force développée (Juel et al., 2000). Toutefois, il n'est pas encore clairement établi si ces perturbations ioniques contribuent à la fatigue pendant un effort de sprint répétés (Bishop et al., 2011).

-Pi

L'altération du couplage excitation-contraction pourrait être impliquée dans la fatigue observée lors de RSE. L'accumulation des phosphates inorganiques (Pi) au niveau musculaire diminuerait la libération du Ca²⁺ par le réticulum sarcoplasmique ce qui limiterait la création des ponts actine-myosine à la fois dans leur nombre et dans leur force (Bishop et al., 2011).

- Métabolisme aérobie et RSa

Lors du sprint initial, les réserves d'ATP sont sollicitées jusqu'à 45% de leurs valeurs de repos (*i.e.*, 25 mmol/kg) alors que la déplétion de la PCR serait de 35 à 55% de la concentration initiale (75-85 mmol/kg) (Spencer et al., 2005). De ce fait, la performance d'un RSE, et donc la RSa, vont dépendre de la capacité de l'athlète à reconstituer ces réserves entre les efforts.

Pendant une série de sprints répétés, la concentration musculaire en PCR diminue significativement et progressivement en raison des périodes courtes de récupération qui ne permettent pas une resynthèse complète. La récupération de ce substrat

énergétique subit une cinétique en deux phases, (i) la phase rapide estimée entre 21 et 57 secondes et (ii), la phase lente mesurée jusqu'à la récupération complète des stocks (*i.e.*, 360 secondes) (Bogdanis et al., 1996; Spencer et al., 2005; Dawson et al., 1997). Alors que la phase rapide de la resynthèse de PCR serait principalement impactée par la disponibilité en O₂ dans le muscle, la phase lente serait, quant à elle, limitée par le pH intramusculaire (McMahon et Jenkins., 2002).

Des relations significatives entre la performance sur les sprints répétés et la quantité de PCR resynthétisée ont été observés (Mendez-Villanueva et al., 2012). La resynthèse de la PCR est fortement dépendante des aptitudes aérobies de l'athlète (Dupont et al., 2005). En effet, la puissance aérobique (VO₂max) influence la vitesse de réoxygénation musculaire (notamment au niveau périphérique lors de la phase rapide) facilitant l'hydrolyse de l'ATP en condition aérobique, ce qui engendre, *in fine*, une meilleure resynthèse de la PCR (Glaister et al., 2005). Ces résultats sont complémentaires à ceux de (Buchheit et al., 2008) qui ont démontré une corrélation entre la vitesse maximale aérobique intermittente (VMI, évaluée par un test 30-15 IFT) et le temps total de sprint au test de RSA (6x15m de sprint avec 14 secondes de récupération), suggérant ainsi un lien fort entre puissance aérobique et RSa.

Lors d'une répétition de sprints, la quantité d'énergie utilisée pour le mouvement est très importante ; il en résulte une production d'acide lactique associée à une accumulation d'ions H⁺ importante, avec des lactatémies pouvant atteindre 6 à 18 mmol/l (Martin Buchheit et Laursen., 2013). Ainsi, la récupération entre les efforts est également déterminée par la capacité tampon de l'athlète. En effet, le décrétement de puissance (évalué sur un test de 5 x 6 secondes de bicyclette ergométrique avec un départ toutes les 30 secondes) est significativement corrélé aux variations de pH sanguin (Bishop et al., 2003). En résumé, la capacité à récupérer entre des sprints répétés est principalement déterminée par une combinaison des aptitudes aérobies du sujet et de sa capacité tampon musculaire (Bishop et al., 2004, Bishop et al., 2011) ; dans ce type d'effort, le métabolisme aérobique intervient à deux niveaux : pour augmenter le niveau de PCR resynthétisé et pour réduire la sollicitation des voies anaérobies (et l'acidose associée) (Lacome., 2013). Ces déterminants de la capacité à récupérer entre les efforts peuvent être influencés par l'intensité et la durée (de l'effort et de la récupération) (Balsom et al., 1992; Spencer et al., 2006) mais également par l'entraînement (Edge et al., 2005, Edge et al., 2006).

4.2.5.3.4. Facteurs nerveux

En addition de la fatigue « périphérique » développée ci-dessus, la fatigue « centrale » joue aussi un rôle dans les diminutions de performances de sprint observées pendant un RSE. Celle-ci se caractérise par des perturbations au niveau du système nerveux, en amont de la jonction neuromusculaire, qui entraînent une altération du recrutement des unités motrices et contribuent à l'apparition de la fatigue (Bishop et al., 2011). Mendez-Villanueva et al. (2008) ont étudié l'évolution des performances mécaniques et du signal électromyographique (EMG) au cours d'un RSE constitué de dix sprints de 6 secondes sur ergocycle avec 30 secondes de récupération. Ils étaient alors les premiers à établir clairement la forte relation linéaire ($R= 0,97$) entre la diminution du travail total effectué pendant les sprints (-25% et -28% entre le sprint 1 et 10 respectivement pour la puissance pic et la puissance moyenne développée) et la diminution de l'amplitude du signal EMG du *vastus lateralis* du quadriceps (-14% de RMS : root mean square entre le sprint 1 et le sprint 10). Plus tard, une autre étude observant les mêmes éléments au cours de 20 sprints sur cycle de 5 secondes entrecoupés de 25 secondes de récupération constatait des résultats similaires (Billaut et Smith., 2010). Dans leur étude, ces auteurs rapportaient une diminution de 23.5% du travail total alors que le signal EMG intégré diminuait respectivement de 14.2% et de 16.4 % pour le *vastus lateralis* et le *rectus femoris*. Ces résultats suggèrent que dans des conditions de fatigue importante, l'incapacité à conserver l'activation musculaire peut devenir un facteur important contribuant à la fatigue pendant des sprints répétés.

4.2.6. Capacité à répéter des efforts de haute intensité (RHIEa)

Bien que la RSa ait été établie comme un facteur important de la performance en rugby, certains auteurs ont remis en question sa pertinence en raison de l'exclusion des efforts de contact. En effet, il n'y a pas de corrélation significative entre la performance à un test de RSa (12x20m de sprint avec un départ toutes les 20s) et la performance à un test de répétition d'efforts intenses (12x20m de sprint achevé par un plaquage avec un départ toutes les 20s) (Johnston et Gabbett., 2011). D'après les auteurs de cette étude, l'absence de relation entre ces 2 mesures traduirait le fait que

les exigences physiologiques et mécaniques des deux types d'efforts sont très différentes, comme en témoignent divers indicateurs physiologiques (temps total au test, la fréquence cardiaque moyenne et maximale atteinte et intensité perçue de l'effort significativement plus élevées lors du test incluant les plaquages). Il semblerait donc que la capacité à répéter les sprints et la capacité à répéter les efforts intenses soient considérées comme deux qualités physiques distinctes.

De façon similaire à la RSA, il est difficile d'obtenir des données uniformes concernant les aptitudes des joueurs de rugby à répéter des efforts de haute intensité. Plusieurs facteurs sont responsables de ce phénomène. Premièrement, les notions de RHIE et *a fortiori* de RHIEa ne sont apparues que récemment dans les recherches sur le rugby, avec, comme décrit précédemment, des définitions des séquences RHIE qui ont évolué dans le temps rendant les données difficilement comparables (Austin et al., 2013, Black et Gabbett., 2015, Sheehan et al., 2022). Deuxièmement, la majorité des études s'intéressant aux RHIE dans le rugby se sont concentrées sur la détermination des demandes en match aux dépens de l'objectivation de leurs aptitudes physiologiques limitant la littérature disponible. Troisièmement, parmi les études qui cherchent à évaluer la RHIEa des joueurs de rugby, on retrouve une grande variété de tests utilisés ce qui rend difficile la comparaison des résultats des tests entre les études. Enfin, bien que la RHIEa ait été évaluée chez les joueurs de rugby dans certaines études, à notre connaissance, aucune étude n'a déterminé les relations entre RHIEa et indicateurs de performances en situation de match. Le tableau présenté ci-dessous renseigne sur les connaissances actuelles concernant la RHIEa des joueurs de rugby en fonction du code de jeu.

Table 13. Capacité à répéter des efforts de haute intensité en rugby.

Référence	Rugby code	Test	Performance moyenne		Indice de fatigue	
			Avants	Arrières	Avants	Arrières
Austin et al., 2013	Rugby à XV	3x20m départ toutes les 20s 60s récupération Arrières : 2x10m de sprint + plaquage Avants : 4x10m poussée de sled avec 10s de récupération	Test 1 : 35.2 ± 2.2 s Test 2 : 35.7 ± 2.6 s	Test 1 : 29.7 ± 0.9 s Test 2 : 29.8 ± 1.0 s	Test 1 : 15.1 ± 5.6 % Test 2 : 16.7 ± 7.3 %	Test 1 : 8.6 ± 3.6 % Test 2 : 9.6 ± 5.9 %
Johnston & Gabbett., 2011	Rugby à XII	12x 20m de sprint suivi par un plaquage avec un départ toutes les 20s	Temps total sprint : 44.6 ± 2.2 s		Sprint décrement : 15.0 ± 3.5%	
Gabbett & Wheeler 2015	Rugby à XIII	4x 10m sprint suivi de 3 plaquages engagé toutes les 6s avec une récupération active de 30m. Départ toutes les 40s	1 ^{er} grade : 3.80 ± 0.08 m.s 2 ^{ème} grade : 3.80 ± 0.09 m.s		1 ^{er} grade : -2.36 ± 1.03% 2 ^{ème} grade : -4.70 ± 2.05%	
Vachon et al., 2020	Rugby à XV	12x20m de sprint suivi d'un plaquage avec 32m de récupération active départ toutes les 30s	Sprint test 1: 3.49 ± 0.22s Sprint test 2: 3.45 ± 0.21s Plaquage test 1: 6.47 ± 1.64 g Plaquage test 2: 5.88 ± 0.46 g		Sprint décrement test 1 : 9.18 ± 4.24% Sprint décrement test 2 : 8.77 ± 3.53 % Plaquage décrement test 1 : 37.33 ± 8.19% Plaquage décrement test 2 : 42.58 ± 11.36% Index combiné test 1: 23.25 ± 5.19% Index combiné test 2: 25.67 ± 6.01%	
Vachon et al., 2021	Rugby à XV	12x20m de sprint suivi d'un plaquage avec 32m de récupération active départ toutes les 30s	Temps total de sprint : 44.1 ± 3.6 s Temps moyen de sprint : 3.5 ± 0.3 s	Temps total de sprint : 39.9 ± 1.2 s Temps moyen de sprint : 3.3 ± 0.1 s	11.6 ± 5.4 %	7.7 ± 2.2 %

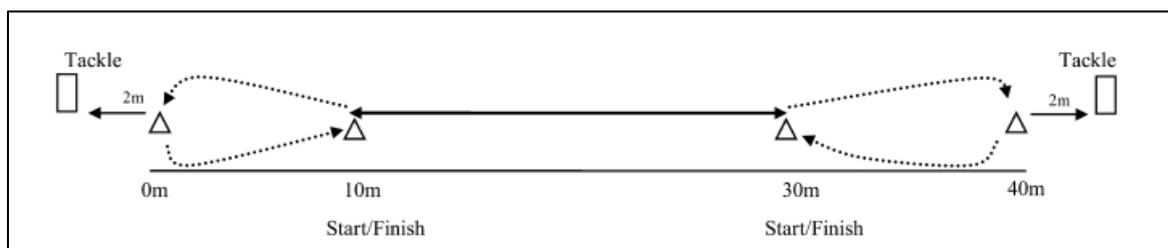
De plus, cette qualité physique semble être associée à différents facteurs de performance physique. Dans ce contexte Vachon et al. (2021) ont identifié que la performance au test de RHIEa pouvait être influencée par la composition corporelle (i.e., Masse grasse 4 plis cutanés), la puissance du bas du corps (i.e., CMJ, 20m sprint) et les aptitudes aérobies (i.e., Bronco test) des joueurs grâce à des corrélations de Pearson et des régressions linéaires multiples. Ainsi, les équations du modèle de performance de la RHIEa étaient : (i) temps total en sprint (s) = $13.69 + 0.01 \times \text{masse grasse} + 0.08 \times \text{Bronco} + 10.20 \times 20 \text{ m sprint}$ et (ii), Décrément (%) = $-14.34 + 0.11 \times \text{masse grasse} + 0.18 \times \text{Bronco} - 9.92 \times 20 \text{ m sprint}$. Ces modèles expliquaient respectivement 88.8% et 68.2% de la variance au test RHIE. Du fait de sa complexité, la RHIEa apparaît donc comme une qualité de physique complète qui s'appuie sur des aptitudes mécaniques et physiologiques multiples (Austin et al., 2013).

4.2.6.1. Évaluation de la RHIEa

Au cours de cette dernière décennie, les méthodes d'évaluation de la RHIEa ont beaucoup évolué s'appuyant ainsi sur différents tests détaillés ci-après par ordre chronologique.

Johnston & Gabbett (2011) ont été les premiers à proposer un test visant à évaluer la RHIEa. Ce test (figure 12) consiste à réaliser un sprint de 20m suivi d'une décélération de 10m avant d'effectuer un plaquage de boudin sur 2m, puis de se replacer en récupération active au point d'arrivée du premier sprint, qui devient le point de départ du second sprint. Les participants doivent réaliser douze répétitions de cet enchaînement sprint/plaquage avec la plus haute intensité possible avec un départ de sprint donné toutes les 20s. Le temps total de sprint ($44.6 \pm 2.2 \text{ s}$), le décrétement de vitesse ($15.0 \pm 3.5 \%$), les FC moyenne ($169.0 \pm 7.7 \text{ b.min}^{-1}$) et maximales ($177.2.0 \pm 8.4 \text{ b.min}^{-1}$) et le RPE ($16.2 \pm 1.1 \text{ u.a}$) étaient les variables relevées lors de ce test.

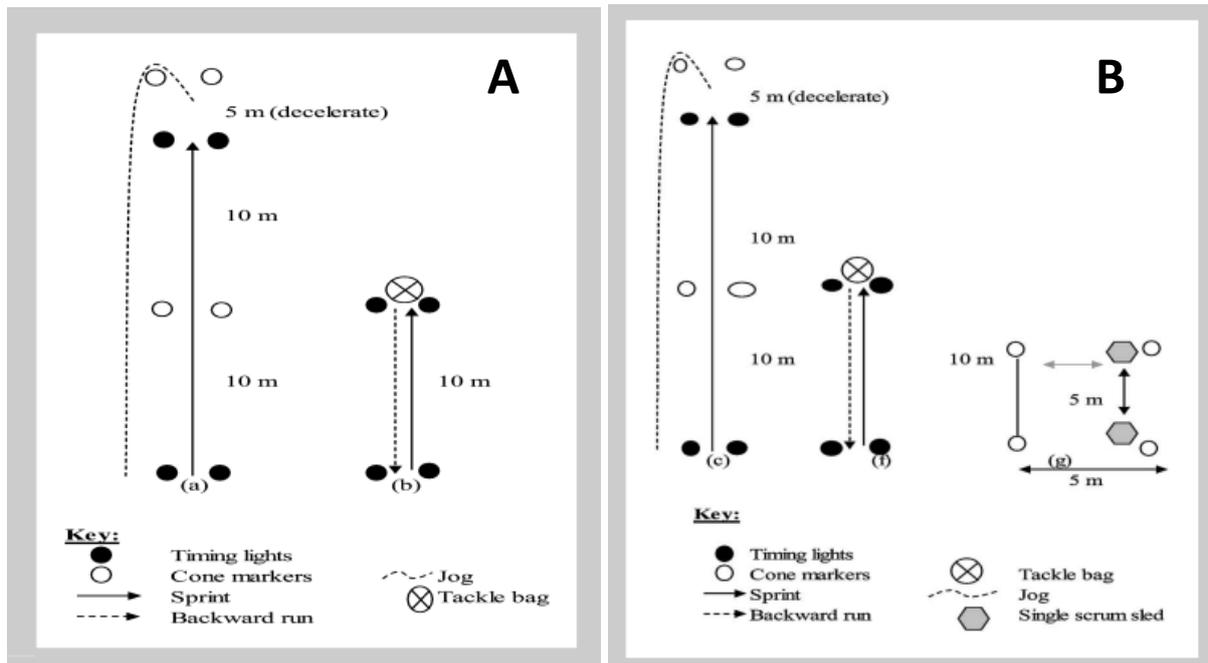
Figure 12. Représentation schématique du Repeated effort Ability test d'après Johnston et Gabbett 2011.



Par la suite, Austin et al., 2013 ont proposé d'évaluer la RHIEa en fonction du poste de jeu avec deux protocoles distincts pour les arrières (Figure 13-A) et pour les avants (Figure 13-B). Dans ce test, les arrières réalisent trois sprints de 20m avec un départ toutes les 20s et une récupération active pour se positionner au départ. Après ces trois sprints, les participants observent 60s de récupération avant de réaliser deux répétitions de 10m de sprint suivis d'un plaquage sur boudin avec 20s de récupération entre chaque. Suite au dernier plaquage, les participants récupèrent pendant 20s avant de recommencer une deuxième série de l'ensemble de l'enchaînement avant de terminer le test par une troisième série de trois sprints de 20m. Chez les avants, chaque joueur effectue trois sprints de 20 m avec un départ toutes les 20s et une récupération active pour se positionner au départ. Après le troisième sprint de chaque série et après un repos de 60 secondes, le joueur réalise une navette de 5m aller-retour en poussant un sled lesté spécifique à la mêlée. Le participant achève cet effort 4 fois, avec 10 s de récupération après chaque effort. Après 20 s de récupération, les participants répètent les trois sprints de 20m avant de passer à l'effort de plaquage. Les participants observent une récupération de 60s, avant de réaliser quatre répétitions de 10m de sprint suivis d'un plaquage sur boudin avec 20s de récupération entre chaque. Une dernière série de 3 sprints conclue le test.

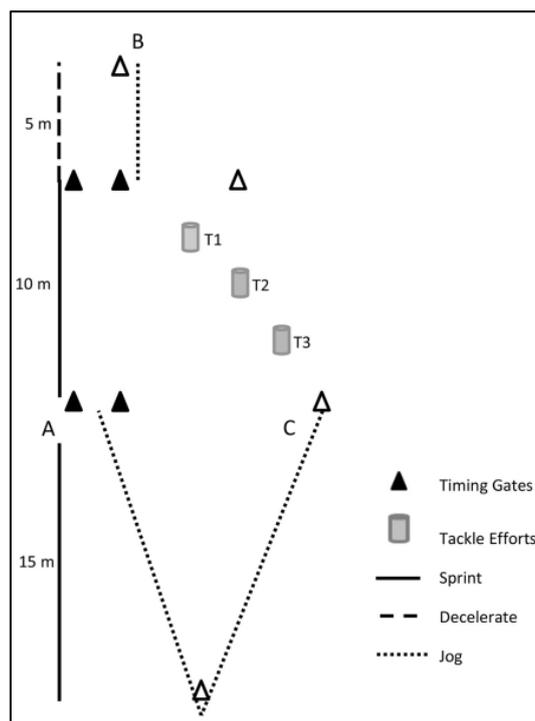
Pour les deux tests, les variables mesurées sont le temps total des 9 sprints (de 28.3 à 31.9 s pour les arrières et de 31.3 à 38.9 s pour les avants) ainsi que le pourcentage de décrement (de 2.2–21.4% pour les arrières et de 7.1 à 30.2% pour les avants).

Figure 13. Représentation schématique du repeated high-intensity exercise performance test d'après Austin et al., 2013.



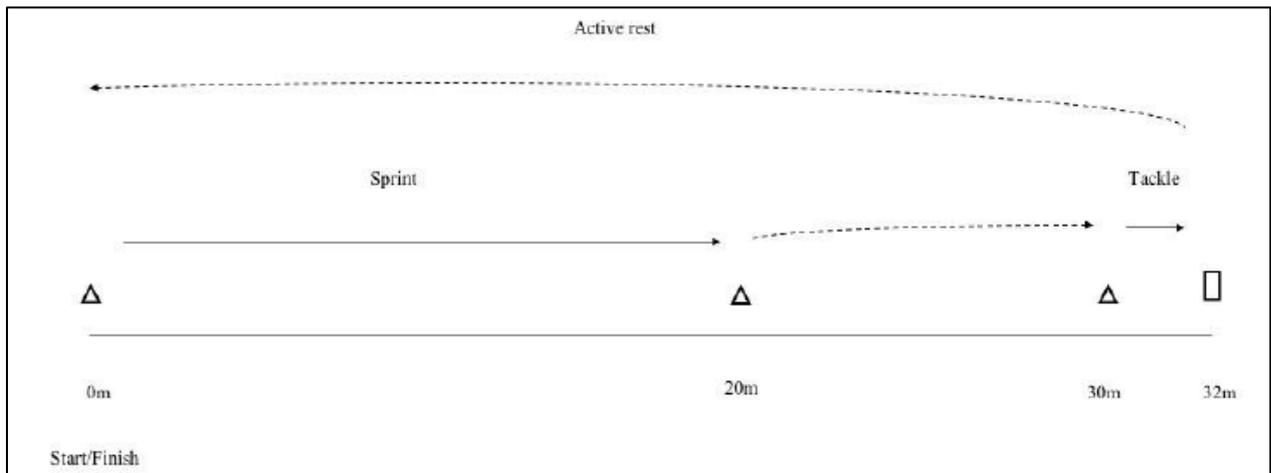
En rugby à XIII, Gabbett et al. (2015) proposent un test (figure 14) pour déterminer la RHIEa dans lequel le participant commence le test au point A, en effectuant un sprint maximal de 10 m, suivi d'une décélération de 5 m jusqu'au point B (effectué environ en 6 s). Le joueur effectue ensuite 3 plaquages en 1 contre 1 avec contact total (T1, T2 et T3), chaque plaquage étant effectué sur un cycle de 6 secondes. Après avoir effectué les 3 plaquages, (C) le participant observe une récupération active (jogging) de 30 m (effectuée en environ 13s) pour revenir au point de départ. Au total, 4 répétitions du test sont réalisées par chaque joueur, et chaque répétition est effectuée sur un cycle de 40 secondes. Les variables mesurées lors de ce test sont la vitesse du premier sprint (1^{er} grade : 3.85 ± 0.07 , 2^{ème} grade : $3.90 \pm 0.20 \text{ m.s}^{-1}$), la vitesse moyenne de sprint (1^{er} grade : $3.80 \pm 0.08 \text{ m.s}^{-1}$, 2^{ème} grade : $3.80 \pm 0.09 \text{ m.s}^{-1}$) et le décrétement de vitesse (1^{er} grade : $-2.36 \pm 1.03\%$, 2^{ème} grade : $-4.70 \pm 2.05\%$). De plus, le playerload 2D (1^{er} grade : 20.8 ± 4.9 , 2^{ème} grade : $25.9 \pm 5.0 \text{ U.A}$) et le décrétement de playerload 2D (1^{er} grade : $-20.6 \pm 8.7\%$, 2^{ème} grade : $-14.4 \pm 10.9\%$) sont également mesurés.

Figure 14. Représentation schématique du repeated high-intensity exercise test d'après Gabbett et al., 2015.



Enfin, plus récemment, Vachon et al. (2020) ont proposé une version réadaptée du test de Johnston & Gabbett., 2011 pour évaluer la RHIEa (figure 15) chez les joueurs de rugby à XV. Ce test consiste à réaliser 12 séries constituées d'un sprint de 20 m immédiatement suivi d'un plaquage sur boudin avec un départ toutes les 30 s. Le chronomètre démarre au début du premier sprint de 20m, puis le participant effectue une décélération de 10m et attend que le chronomètre atteigne 10s avant d'effectuer le plaquage et utilise le temps restant pour se replacer en récupération active jusqu'à la ligne de départ et se préparer pour le sprint suivant. Lors de ce test, les auteurs mesurent (i) des variables relatives au sprint : temps total de sprint (41.91 ± 2.62 s pour le test 1 et 41.45 ± 2.54 s pour le test 2), le temps moyen de sprint (3.49 ± 0.22 s pour le test 1 et 3.45 ± 0.21 s pour le test 2) et le décrement de sprint 9.18 ± 4.24 % pour le test 1 et 8.77 ± 3.53 % pour le test 2) et (ii) des variables relatives à l'impact sur boudin : quantité totale d'impacts (77.62 ± 19.67 g pour le test 1 et 70.02 ± 16.70 g pour le test 2), impact moyen (6.47 ± 1.64 g pour le test 1 et 5.88 ± 0.46 g pour le test 2) et le décrement de l'impact (37.33 ± 8.19 % pour le test 1 et 42.58 ± 11.36 % pour le test 2). Les auteurs utilisent également un indice combiné de décrement en calculant la moyenne du décrement de sprint et du décrement d'impact (23.25 ± 5.19 % pour le test1 et 25.67 ± 6.01 % pour le test 2).

Figure 15. Représentation schématique du repeated high-intensity exercise test d'après Vachon et al., 2020.



4.2.7. Aptitudes aérobies

Bien que beaucoup d'efforts en rugby soient de courte durée, leur répétition nécessite des qualités aérobies importantes. La performance des joueurs de rugby est, de fait, notamment liée à leurs aptitudes aérobies (Duthie et al., 2005). Parmi les aptitudes aérobies, on dissocie généralement d'une part la puissance aérobique (généralement évaluée au travers de la consommation maximale en oxygène (VO_{2max}), ou indirectement par la vitesse maximale aérobique (VMA) ou la vitesse maximale intermittente (VMI)) et d'autre part l'endurance aérobique (généralement évaluée par le biais d'épreuves de temps limite ou la mesure de seuils lactiques ou ventilatoires).

Concernant la puissance aérobique, bien que VO_{2max} , VMA et VMI soient considérés comme pertinents (Duthie et al., 2003), la VMI est l'aptitude la plus communément utilisée et évaluée en rugby à XV. Pour la mesurer, il existe un nombre conséquent de tests. En rugby à XV, les tests intermittents tels que le 30-15 Intermittent Fitness Test et le Yo-Yo Intermittent Recovery Test (YYIRT) sont davantage utilisés ces dernières années (Posthumus et al., 2020; Natera et al., 2019).

La littérature a identifié des différences significatives de puissance aérobique en fonction du poste de jeu. En effet, VO_{2max} est supérieur chez les arrières $48.3 \pm 2.1 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ par rapport aux avants ($41.2 \pm 2.7 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) (Scott et al., 2003). Une revue de littérature réalisée par Duthie et al. (2003) confirme ces résultats, avec des VO_{2max} mesurées de manière directe sur ergocycle ou sur tapis de course comprises entre

43.2 et 55.8 ml.kg⁻¹.min⁻¹ chez les avants et entre 46.7 et 59.5 ml.kg⁻¹.min⁻¹ chez les arrières. Ces différences sont également observées du côté des mesures indirectes de la puissance aérobie. En effet, dans une étude qui recense les aptitudes physiques de joueurs professionnels de rugby à XV, il est rapporté que la distance parcourue par les avants au YYIRT est de 32.2 ± 6.8 % inférieure à celle des arrières (1516.5 ± 291.9 m vs 2237.5 ± 266.3 m respectivement ; ES : -2.56 ± 0.44) (Posthumus et al., 2020) témoignant d'une VMI inférieure. Ces résultats confirment ceux précédemment proposés par Darral-jones et al. (2016) qui montraient également des performances différentes chez les U21 entre avants et arrières au YYIRT (1142.9 ± 353.9 m vs 1384.0 ± 249.2m respectivement ; d=0.81 ± 0.94). De plus, les auteurs rapportaient également des différences de VMI de même ordre au 30-15 IFT avec une performance de 18.2 ± 1.1 km.h⁻¹ chez les avants U18 contre 19.2 ± 0.98 pour les arrières U18 (d=0.87 ± 0.85).

L'endurance aérobie est également fréquemment évaluée en rugby à XV à l'aide de tests continus sans incrément de vitesse, dans lesquels le participant doit parcourir une distance donnée le plus rapidement possible (Swaby et al., 2016). Certains de ces tests proposent des changements de direction comme le BRONCO test (Vachon et al., 2021). Similairement aux qualités de puissance aérobie, on retrouve des différences d'endurance aérobie en fonction des postes. Alors qu'une vitesse moyenne de course sur un test de 1200m parcourus le plus vite possible de 15.1± 1.6 km.h⁻¹ est observée chez les avants, les arrières atteignent une performance de 17.7± 0.5 km.h⁻¹ (p=0.001 ; ES=2.20) (Swaby et al., 2016). Des différences semblables sont observées au BRONCO test (i.e., qui consiste à parcourir une distance de 1200m avec des changements de directions le plus vite possible) avec une performance de 319.6 ± 25.1 s chez les avants contre 287.4 ± 8.5 s.

Table 14. Aptitudes aérobies des joueurs de rugby en fonction du poste.				
Référence	Avants	Arrières	Comparaisons	Test utilisé
Posthumus et al., 2020	1516.5 ± 291.9 m	2237.5 ± 266.3 m	Avants vs arrières = -32.2 ± 6.8 % ES= -2.56	YYIRT 1
Swaby et al., 2016	15.1 ± 1.6 km.h ⁻¹	17.7 ± 0.5 km.h ⁻¹	P=0.001 ES=2.20	1200m all out
Fornasier-santos., 2018	Pilier gauche : 17.4 ± 1.8 Talonneur : 18.6 ± 0.8 Pilier droit : 17.0 ± 0.4 Deuxième ligne : 18.4 ± 1.6 Troisième ligne : 18.7 ± 1.0	Demi de mêlée : 20.3 ± 0.5 Demi d'ouverture : 19.8 ± 0.3 Centre : 18.9 ± 1.3 Ailier : 19.7 ± 1.2 Arrière : ND		
Vachon et al., 2021	319.6 ± 25.1s	287.4 ± 8.5 s	P<0.05 ES=1.70	Bronco test
Darral-jones 2016	<i>YYIRT 1</i> U16 : 971.4 ± 327.7 m U18 : 1080.0 ± 240m U21 : 1142.9 ± 353.9m <i>30-15 IFT</i> U16: 18.0 ± 1.4 km.h ⁻¹ U18: 18.2 ± 1.1 km.h ⁻¹ U21 : 18.8 ± 1.3 km.h ⁻¹	<i>YYIRT 1</i> U16 : 1346.6 ± 220.6 m U18 : 1466.6 ± 450.9 m U21 : 1384.0 ± 249.2 m <i>30-15 IFT</i> U16: 18.8 ± 1.1 km.h ⁻¹ U18: 19.2 ± 0.98 km.h ⁻¹ U21 : 19.4 ± 0.5 km.h ⁻¹	<i>YYIRT 1</i> U16 : 1.33 ± 0.64, presque certain U18 : 0.96 ± 0.94, probable U21 : 0.81 ± 0.94, probable <i>30-15 IFT</i> U16 : 0.62 ± 0.69, probable U18 : 0.87 ± 0.85, probable U21 : 0.59 ± 0.93, non clair	YYIRT 1 et 30-15 IFT
Austin et al., 2013	De 600m à 20120m	De 1080m à 2360m	ND	YYIRT 1
Lacome et al., 2014	Total avants : 15.5 ± 0.8 km.h ⁻¹ Cinq de devant : 14.9 ± 0.5 km.h ⁻¹	Total arrières : 15.4 ± 1.1 km.h ⁻¹ Arrières intérieurs : 15.4 ± 0.8 km.h ⁻¹	NS	3min-1min avec incrémentation de vitesse

	Troisième ligne : $16.1 \pm 1.3 \text{ km.h}^{-1}$	Arrières extérieurs : $15.7 \pm 0.9 \text{ km.h}^{-1}$		jusqu'à épuisement
Johnston et al., 2014	$19.1 \pm 1.2 \text{ km.h}^{-1}$		<i>ND</i>	30-15 IFT
Johnston et al., 2015	Groupe haut niveau : $1516 \pm 182 \text{ m}$ Groupe bas niveau : $1196 \pm 70 \text{ m}$		<i>ND</i>	YYIRT 1
Natera et al., 2019	De 18.0 à 20.5 km.h^{-1}		<i>ND</i>	30-15 IFT

ND, non disponible ; NS, non significatif

En dépit de ces différences, la performance aérobique de l'ensemble des joueurs est considérée comme un facteur déterminant de la performance en rugby à XV. D'après Cunningham et al. (2018), la performance au YYIRT serait corrélée à plusieurs indicateurs clés de la performance tels que le nombre de plaquages réalisés ($r=0.717$) ainsi que l'efficacité dans les rucks offensifs ($r = 0,630$) et dans les plaquages ($r = 0,540$) chez les avants. Ces résultats sont confirmés par (Swaby et al., 2016) qui observent une forte corrélation entre le niveau de VMA et la distance parcourue ($r = 0.746$, $p < 0.001$) lors d'un match de rugby à XV. De plus, la puissance maximale aérobique des joueurs pourrait être un facteur qui influencerait le statut des joueurs. En effet, dans le rugby à XIII, il a été rapporté que le VO_{2max} estimé à partir du test de Ramsbottom et al. (1988) était significativement inférieur chez les joueurs non sélectionnés comparé aux joueurs remplaçants et titulaires (Gabbett et al., 2011).

Par ailleurs, il a été démontré que les qualités de puissances et d'endurance aérobique pouvaient être des déterminants majeurs de la RSA et de la RHIEa. Dans une étude qui mesurait la reproductibilité et les déterminants d'un test de RSA (Wales Anaerobic Test : WAT), (Beard et al., 2022) rapportent que la VMI obtenue au 30-15 IFT est un déterminant significatif du temps total de sprint pour l'ensemble de l'équipe ($p < 0.001$) et chez les arrières ($p = 0.016$) mais pas pour les avants. De façon analogue, dans une étude qui visait à identifier les déterminants de la RHIEa, les auteurs rapportent que l'endurance aérobique des joueurs de rugby à XV, évaluée avec un BRONCO test, est fortement corrélée au temps total en sprint et au pourcentage de décrétement de performance ($r = 0.90$ et 0.82 respectivement) d'un test RHIE de 12x20m de sprint suivi d'un plaquage (Vachon et al., 2021). Ces résultats contrastent avec ceux rapportés par Austin et al. (2013), qui n'identifiaient pas de relation significative entre la RHIEa et la performance au YYIRT. Toutefois, bien que l'endurance aérobique soit déterminante du temps total de sprint et du pourcentage de décrétement chez les avants ($r = 0.91$ et 0.89 respectivement, $p < 0.01$), elle ne l'est pas dans cette étude chez les arrières (Vachon et al., 2021). Ces résultats montrent que les aptitudes aérobiques peuvent influencer directement la performance en match mais également qu'elles sont déterminantes pour d'autres aptitudes physiologiques.

4.2.8. Aptitudes énergétiques anaérobies

Comme décrit précédemment, le rugby à XV est un sport intermittent, caractérisé par des efforts répétés de haute intensité, impliquant des changements fréquents de direction, des sprints et des contacts physiques importants (Deutsch et al., 2007). Ces contraintes mécaniques élevées interviennent sur des efforts brefs et intenses et sont entrecoupés par des périodes de récupérations de nature aléatoire, et de durée souvent incomplète ce qui conduit les joueurs à grandement utiliser les filières anaérobies alactique et lactique qui jouent ainsi un rôle essentiel dans la capacité d'un joueur à maintenir une performance de haute intensité tout au long du match. Néanmoins, il est difficile de présenter des données sur les aptitudes anaérobies en raison de la grande variabilité des méthodes employées pour évaluer cette aptitude énergétique. Toutefois, certains auteurs ont déterminé la contribution de la filière lactique en mesurant la concentration en lactate sanguin en match (Duthie et al., 2003). Certaines études rapportent ainsi des concentrations en lactate sanguin de 6.6 mmol.l⁻¹ chez les avants contre 5.1 mmol.l⁻¹ chez les arrières (Deutch et al., 1998) alors qu'une concentration en lactate sanguin de 2.8 ± 1.6 mmol.l⁻¹ était observée pour l'ensemble des joueurs (Docherty et al., 1988). De manière plus générale, les lactatémies recensées sont comprises entre 2.8 ± 1.6 et 6.7 ± 1.6 mmol.l⁻¹ (Duthie et al., 2003). L'hétérogénéité de ces résultats provient des méthodes de mesures de la lactatémie. En effet, la lactatémie des joueurs est mesurée pendant le match, durant les arrêts de jeux pour certaines études (Deutsch et al., 1998), alors que dans d'autres, la mesure est réalisée 5 à 10 minutes après le match (Docherty et al., 1988), ce qui influence directement les concentrations en lactate sanguin. De plus, comme les mesures ne sont effectuées qu'à certains moments dans le match, les valeurs mesurées ne représentent pas une phase spécifique ou intense du match et caractérisent davantage les activités des joueurs dans un délai court précédant la mesure plutôt qu'une demande globale durant le match (Duthie et al., 2003).

4.3. Développement de la capacité à répéter des sprints ou des efforts de haute intensité

4.3.1. Développement de RSa

4.3.1.1. Les méthodes d'entraînement aérobic continu et intermittent

Ces dernières décennies, de nombreuses études portant sur les méthodes permettant de développer la RSa ont été réalisées en sports collectifs. Il a été montré à plusieurs reprises qu'un développement de la puissance aérobic (VO_{2max}) améliorerait la RSa (Billat., 2012; Bishop et al., 2008). Dans leur étude comparant les effets de l'entraînement aérobic de haute intensité (HIT : 6 à 10 x 2min-1min d'intervalle à 120-140% du seuil lactatique) et l'entraînement continu d'intensité modérée (MIT : 20 à 30 min à 80-95% du seuil de lactate) sur la capacité à répéter des sprints (RSa : évaluée sur un test de 5x6s d'effort – 24s de récupération sur ergocycle) chez 20 femmes, les auteurs montrent une amélioration de la performance avec une augmentation significative du travail total (J) lors du test chez les deux groupes avec une augmentation nettement plus importante à la suite de l'entraînement HIT que le MIT (13 contre 8,5 %, respectivement) (Edge et al., 2005).

4.3.1.2. Les méthodes d'entraînement en résistance

D'autres études ont montré que la RSa pouvait être améliorée après un entraînement en résistance avec des récupérations courtes (*i.e.*, 20s) (Edge et al. 2006 ; Hill-Haas et al. 2007). Après un protocole d'entraînement de 5 semaines en résistance (3 à 5 séries de 15 à 20 répétitions) et à récupération courte (20 s), (Edge et al. 2006) constatent une augmentation de 10% du nombre de joules produits (*i.e.*, au test RSa de 5x 6s sprint avec 24s de récupération) ainsi qu'une augmentation du seuil lactatique et une réduction de $[H^+]$ dans le muscle et le sang après l'exercice, bien que ni VO_{2max} ni la capacité tampon n'évoluent. Ces résultats suggèrent que l'amélioration de la RSa serait dans ce contexte liée à une augmentation de l'endurance aérobic (Edge et al., 2006).

4.3.1.3. Les méthodes d'entraînement en force et en vitesse

L'entraînement en force est une méthode d'entraînement efficace de la RSA, notamment en améliorant la performance du sprint isolé (Delecluse., 1997). Il a également été démontré que la RSA pouvait être améliorée après un entraînement en vitesse/agilité (3 à 4 x 10m sprint + 2 x exercices d'agilité + 5-m navette sprint), qui permettait une diminution du temps moyen de sprint (5.99 ± 0.11 vs 5.81 ± 0.13 s respectivement pour pré-test et post-test) au test de RSA en navette (6x30m de sprint en navette avec un départ toutes les 30s) (Martin Buchheit, Mendez-Villanueva, Quod, et al. 2010).

4.3.1.4. Les méthodes d'entraînement en RSE

Dans une autre étude, (Martin Buchheit, Mendez-Villanueva, Delhomel, et al. 2010) comparent les effets de l'entraînement de force explosive par rapport à l'entraînement au sprint répété en navette (2 à 3 séries de 5 à 6x 15 à 20m sprints répétés de navette entrecoupés de 14 secondes de récupération passive ou 23 secondes de récupération active) sur la RSA (6x 30m de sprint en navette avec un départ toutes les 30s) chez 15 adolescents masculins durant 10 semaines d'entraînement. Ces chercheurs montrent que le sprint répété en navette entraîne une plus grande amélioration du meilleur temps au test RSA (-2.90 ± 2.1 vs $-0.08 \pm 3.3\%$) et du temps moyen au test RSA (-2.61 ± 2.8 vs $-0.75 \pm 2.5\%$) comparé à l'entraînement en force explosive. Ces résultats montrent que les sprints répétés en navette et l'entraînement en agilité améliorent efficacement la RSA (Martin Buchheit, Mendez-Villanueva, Delhomel, et al. 2010 ; Martin Buchheit, Mendez-Villanueva, Quod, et al. 2010). Ces résultats confirment ceux avancés par, (Bravo et al., 2008) qui avaient enregistré une amélioration du temps moyen au sprint (7.53 ± 0.21 à 7.37 ± 0.17 s) après 7 semaines d'entraînement en répétition de sprint (3 séries de 6x 40m de sprint avec 20s de récupération).

Parallèlement à ces méthodes « traditionnelles » pour améliorer la RSA, certains auteurs ont proposé des entraînements en répétition de sprint en condition d'hypoxie induite par une hypoventilation volontaire (Brocherie et al., 2017). Des améliorations de la RSA étaient observées après un entraînement en RSE en condition d'hypoxie induite par une hypoventilation volontaire comparé à un entraînement en RSE en normoxie (Trincat et al., 2017). Ainsi, les auteurs enregistraient une augmentation du

nombre de sprints après l'entraînement en sprints répétés en hypoxie (7.1 ± 2.1 vs 9.6 ± 2.5 sprints entre pré et post-test respectivement) mais pas après l'entraînement en sprints répétés en normoxie (8.0 ± 3.1 vs 8.7 ± 3.7 entre pré et post-test respectivement). En rugby à XV, des recherches récentes ont investigué ce sujet et montrent des améliorations importantes de la RSa. En effet, dans une étude qui compare les effets de 7 sessions d'entraînement en répétition de sprint en hypoxie induite par hypoventilation volontaire et en répétition de sprint en normoxie chez 21 joueurs de rugby professionnels, Fornasier-Santos et al. (2018) démontrent une augmentation significative du nombre de sprints réalisés pendant le test RSA après l'entraînement en répétition de sprint en hypoxie induite par hypoventilation ($9,1 \pm 2,8$ vs. $14,9 \pm 5,3$; +64%) mais pas après l'entraînement en répétition de sprint en normoxie ($9,8 \pm 2,8$ vs. $10,4 \pm 4,7$; +6%) (Fornasier-Santos et al., 2018).

4.3.2. Développement de RHIEa

Bien que la capacité à répéter des efforts à haute intensité soit déterminante dans la performance en rugby à XV, la littérature scientifique présente peu d'éléments sur les méthodes d'entraînement permettant d'améliorer cette qualité physique, considérée comme différente de la RSa (Johnston et Gabbett., 2011). A notre connaissance, une seule étude a montré l'efficacité d'une méthode d'entraînement pour développer RHIEa. Il s'agit de l'étude menée par (Vachon et al., 2022) qui évalue l'effet de protocoles d'entraînement intermittent de haute intensité (HIIT) spécifiques au rugby sur la RHIEa chez 14 jeunes joueurs élite. Le test utilisé pour évaluer la RHIEa consiste à réaliser 12 séquences de 20m de sprint immédiatement suivis d'un plaquage puis de 30m de récupération active avec un départ toutes les 30 s. Deux types de d'entraînement HIIT étaient proposés : dans le premier, l'HIIT intégrait des courses, et dans le second l'HIIT intégrait des contacts (plaquages). Après 7 sessions d'entraînement réparties sur 4 semaines, les auteurs enregistrent une amélioration modérée du temps de sprint total ($-3,91 \pm 2,68$ %), du nombre de sprint $\geq 90\%$ du meilleur temps de référence ($74,6 \pm 123,7$ %), et une diminution importante du pourcentage de décrétement ($-23,1 \pm 20,5$ %). De plus, le groupe ayant suivi l'HIIT « course » enregistre des réductions plus importantes du pourcentage de décrétement de vitesse comparé au groupe ayant suivi l'HIIT « contacts » ($-28,6 \pm 20,2$ % vs $-17,6 \pm 20,7$ % respectivement). Les auteurs concluent ainsi (i) qu'un entraînement HIIT

spécifique permet d'améliorer efficacement la capacité à produire des RHIE (donc RHIEa) et (ii) que l'amélioration des indices du test RHIEa liée aux capacités aérobies pourrait être limitée par la réduction des intensités de courses qui caractérisaient l'entraînement HIIT « contact ».

5.Synthèse et objectifs de travail

Le rugby à XV est un sport collectif avec des exigences physiologiques et mécaniques élevées. Pour répondre à ces exigences, les joueurs doivent développer l'ensemble des qualités physiques nécessaires à la performance, parmi lesquelles la puissance (et donc la force et la vitesse) et l'endurance sont des aptitudes déterminantes. Toutefois, des différences significatives de profil d'activité entre les différents postes sont à considérer, en particulier entre les joueurs avant et arrière. Les joueurs avant sont généralement davantage concernés par les efforts de contacts (Plaquage, rucks, mêlée et maul) et possèdent ainsi des caractéristiques physiques orientées vers la force maximale et la puissance musculaire. A l'inverse, les joueurs arrière, qui sont davantage concernés par les efforts de déplacements (course à haute intensité, accélérations et sprints) possèdent des qualités de vitesses et des aptitudes aérobies supérieures à leurs homologues avants. Dans ce contexte, le caractère intermittent de l'activité ajouté à l'intensité des efforts exige que les joueurs soient à la fois capables de produire des efforts de haute intensité, mais également de les répéter sur des durées aléatoires et avec des récupérations incomplètes.

De ce fait, la RSa est considérée dans la littérature comme un facteur déterminant de la performance en sports collectifs et en rugby à XV. Toutefois, des études plus récentes ont considéré cette qualité physique comme incomplète pour évaluer la capacité à répéter des efforts de haute intensité en rugby en raison de l'exclusion des efforts de contacts qui ajoutent des contraintes mécaniques et augmentent la fatigue physiologique. Dans ce contexte, plusieurs auteurs suggèrent de s'intéresser plus précisément aux capacités à répéter des efforts de haute intensité. Bien que certains liens entre la RHIEa et les performances en rugby aient été établis, peu de données ont été publiées concernant les méthodes d'entraînement efficaces pour développer cette qualité physique.

La revue de la littérature a permis premièrement d'identifier un grand nombre d'association entre des facteurs de performance en match et les aptitudes des joueurs à produire des efforts de haute intensité comme les sprints. Dans ce contexte, la logique interne de l'activité étant d'avancer constamment, les joueurs de rugby organisent leur locomotion en conséquence, ce qui a pour incidence de générer des contraintes d'application de force horizontale. Toutefois, bien que la capacité d'application de force horizontale en sprint ait été reliée à la performance en sprint linéaire, aucune recherche ne s'est intéressée aux liens potentiels entre les capacités d'application de force horizontale en sprint et des efforts non linéaires, tels que les contacts en rugby. Basés sur ces constats, le premier axe de la thèse investiguera les relations entre la capacité des joueurs à produire des efforts de haute intensité et la performance en situation écologique. Plus précisément, dans un premier projet expérimental, nous déterminerons comment les capacités de production de force horizontale mesurée en sprint linéaire pourraient influencer l'efficacité technique des efforts de contacts en situation de match.

La littérature scientifique a également mis en évidence des relations entre la capacité à répéter ces efforts de haute intensité lors d'un match de rugby et certains facteurs de performance. Parmi eux, la capacité à répéter des sprints (RSa) et la capacité à répéter des efforts de haute intensité (RHIEa) sont considérées comme deux qualités physiques essentielles à la performance en rugby à XV. Toutefois, bien qu'elles soient beaucoup étudiées, les informations sur les relations entre ces deux qualités physiques et la performance en situation écologique sont encore incomplètes. Dans ce contexte, le deuxième axe de recherche s'intéressera aux relations entre la capacité à répéter des efforts de haute intensité et les indicateurs de performance en match. Plus précisément, cet axe sera alimenté par un deuxième projet de recherche qui s'intéressera aux relations entre la RSa et les facteurs de performance en match associés aux postes de jeu. L'objectif de cette étude sera de définir en quoi le niveau de RSa est déterminant pour la performance en rugby à XV, quel que soit le poste de jeu. Cet axe sera complété par un troisième projet de recherche, dans lequel l'objectif sera de caractériser l'évolution de la performance mécanique de différents efforts de force et de vitesse constituant une séquence RHIE. Ainsi, l'objectif sera de déterminer comment l'intensité des efforts est altérée au cours d'une séquence RHIE.

Enfin, la littérature a considéré la RSa comme un déterminant majeur de la performance en rugby à XV avec un nombre conséquent d'études qui recensent une grande quantité de méthodes d'entraînement pour développer cette qualité physique. Toutefois, nous avons vu que la RHIEa est également un déterminant majeur de la performance en rugby. Alors que la RSa et la RHIEa sont définies comme deux qualités physiques distinctes, les connaissances sur les méthodes de développement de la RHIEa et leurs effets sur la performance comparé aux méthodes de développement de la RSa sont encore très limitées. Partant de ces constats, le troisième axe de recherche portera sur l'efficacité de méthodes d'entraînement visant à développer la capacité des joueurs à répéter des efforts de haute intensité en situation écologique. Cet axe comportera un quatrième projet de recherche, dans lequel l'efficacité de deux méthodes d'entraînement en répétition d'effort de haute intensité sur les performances en match et la RHIEa sera comparée, la première visant à développer la RSa et la deuxième cherchant à améliorer la RHIEa.

TRAVAUX EXPERIMENTAUX

Axe 1 : Produire les efforts de haute intensité

Étude 1. Relations entre les capacités de production de force horizontale en sprint et l'efficacité technique des efforts de contact en situation de compétition.

Problématique

Le rugby à XV est un sport intermittent de contact et de déplacement de haute intensité. Dans ce contexte, les joueurs de rugby sont amenés à répéter des efforts de force et de vitesse, entrecoupés de phases de récupération de durée et d'intensité variables. Le principe fondamental du jeu étant d'avancer, les joueurs sont contraints de se déplacer constamment vers l'avant, avec ou sans le ballon, et quelle que soit la forme de jeu utilisée. Pour répondre à cette exigence, les joueurs organisent leur locomotion dans le but de progresser, ce qui finit par générer des contraintes d'application de force horizontale à différentes vitesses. Parmi ces efforts de haute intensité, on trouve notamment des situations de ruck et de plaquage (178 ± 27 rucks et 270 ± 25 plaquages par match) (Cuniffe et al., 2009, Dubois et al., 2020) et des phases de course, avec des accélérations maximales et des sprints qui permettent de casser des plaquages et de créer des franchissements de la ligne défensive (Den hollander., 2016, Gabbett et al., 2007). Dans ce contexte produire des vitesses de course élevées (Gabbett et al., 2012, Duthie et al., 2006) et des changements de vitesse (i.e., accélération/décélération) (Quarrie et al., 2013), quelle que soit la position du joueur semblent être les facteurs clés de la performance en rugby à XV.

Pendant le sprint, la capacité de production d'une force horizontale sur le sol est considérée comme un indicateur majeur de la performance d'accélération (Morin et al., 2011). Dans les efforts de contact, les joueurs poussent vers l'avant pour faire reculer leur adversaire ; cela implique la capacité de produire et d'appliquer une plus grande force horizontale sur le sol. Dans les deux situations, le joueur doit produire une poussée maximale dans une direction horizontale. Samozino et al. (2016) ont proposé une méthode fiable pour mesurer, à travers la relation force-vitesse

horizontale, la capacité de l'athlète à produire une force horizontale nette pendant le sprint sur une large gamme de vitesses de course.

Toutefois, jusqu'à présent, la capacité de production de force horizontale évaluée au cours d'un sprint linéaire n'a été liée qu'à la performance du sprint linéaire (Morin et al., 2016, Lahti et al., 2020). Dans ce contexte, les liens potentiels entre les caractéristiques du profil FV et les tâches spécifiques du rugby n'ont jamais été explorés. Par conséquent, l'objectif de l'étude était d'examiner la relation entre les différents paramètres de la capacité de production de force horizontale lors du sprint et l'efficacité des joueurs dans des efforts clés tels que les plaquages, les rucks et les duels offensifs. L'hypothèse principale était que l'efficacité technique des duels, des plaquages et des rucks serait associée à la capacité de production et d'orientation de la force horizontale à faible vitesse (i.e., F_0 et RF_{max}) pour les avants comme pour les arrières.

Méthodes

Pour répondre à cette problématique, nous avons réalisé une analyse rétrospective de 12 matchs consécutifs pendant laquelle 33 joueurs professionnels de rugby à XV (répartis en deux catégories : 20 avants et 13 arrières) ont réalisé un sprint de 30m durant lequel leur profil FV était évalué. L'efficacité technique (pourcentage des tentatives réussies par rapport au nombre total de tentatives) dans les duels offensifs, les plaquages et les rucks a été évaluée à partir de critères objectifs au cours des 12 matchs. La corrélation de Pearson a été utilisée pour évaluer les relations entre les paramètres de capacité de production de force horizontale dans le sprint, tels que la puissance propulsive maximale (P_{max}), la force maximale théorique (F_0), la vitesse maximale théorique (V_0), le rapport maximal de la force horizontale (RF_{max}), et le taux de diminution de ce rapport avec l'augmentation de la vitesse (DRF), et l'efficacité technique des efforts de contact. Deux modèles de régression linéaire multiple ont été utilisés pour déterminer si l'efficacité des efforts de contact était influencée par les déterminants de l'application de la force horizontale dans des conditions de faible ou de forte vitesse. Le premier modèle, qui prenait en compte F_0 et la V_0 , a servi d'analyse macroscopique, tandis que le second modèle, qui utilisait RF_{max} et DRF, a été utilisé comme analyse approfondie pour identifier les déterminants les plus significatifs de l'efficacité technique lors des efforts de contact.

Opposition Skill Efficiency During Professional Rugby Union Official Games Is Related to Horizontal Force-Production Capacities in Sprinting

Paul Glaise,^{1,2} Isabelle Rogowski,¹ Pierre Samozino,³ Jean-Benoit Morin,⁴
Baptiste Morel,³ and Cyril Martin¹

¹Inter-university Laboratory of Human Movement Biology EA 7424, University Claude Bernard Lyon 1, University of Lyon, Lyon, France;

²USBPA Rugby, Bourg en Bresse, France; ³Inter-university Laboratory of Human Movement Biology EA 7424, University Savoie Mont-Blanc, Chambéry, France;

⁴Inter-university Laboratory of Human Movement Biology EA 7424, University Jean Monnet Saint-Etienne, University of Lyon, Saint-Etienne, France

Purpose: This study aimed to determine relationships between parameters of force-production capacity in sprinting and opposition skill efficiency in rugby union games according to position. **Methods:** The sprint force-velocity profile of 33 professional rugby union players divided into 2 subgroups (forwards and backs) was measured on a 30-m sprint. Skill efficiencies (in percentage) of offensive duels, tackles, and rucks were assessed using objective criteria during 12 consecutive competitive games. Pearson correlation was used to determine the relationships between parameters of horizontal force-production capacity in sprinting (maximum propulsive power, theoretical maximum force [F_0], theoretical maximum velocity, maximum ratio of horizontal force [RF_{max}], and rate of decrease of this ratio of forces with increasing velocity) and skill efficiencies. Two multiple linear regression models were used to observe whether skill efficiencies could depend on determinants of horizontal force application in low- or high-velocity conditions. A first model including F_0 and theoretical maximum velocity was used as a macroscopic analysis, while a second model including RF_{max} and rate of decrease of this ratio of forces with increasing velocity was used as microscopic analysis to determine the most significant determinants of skill efficiency. **Results:** All skill efficiencies were strongly correlated with maximum propulsive power in forwards and backs. In forwards, F_0 and RF_{max} were the key predictors of dueling, rucking, and tackling efficiency. In backs, F_0 was the main predictor of dueling and rucking efficiency, whereas RF_{max} was the key predictor of dueling and tackling efficiency. F_0 and theoretical maximum velocity equivalently contributed to tackling performance. **Conclusions:** In rugby union forward and back players, skill efficiency is correlated with maximum propulsive power and may be more explained by horizontal force-production capacity and mechanical effectiveness at lower velocities than at higher velocities.

Keywords: force-velocity, propulsive power, key performance indicator

Rugby union is an intermittent sport with high-intensity collision and running activity,¹ which requires repeated high-intensity explosive force and velocity tasks interspersed with recovery phases of various duration and intensity.² The rules and principles of rugby union constrain players to move constantly forward with or without the ball regardless of the form of play used. To meet this requirement, the players organize their locomotion with the aim of progressing, which eventually generates forward-oriented ground-reaction-force constraints at different velocities.

High-intensity efforts in rugby union include collision and battle situations (178 [27] rucks and 270 [25] tackles per game),³⁻⁵ and running phases with maximum accelerations, and velocity sprints³ aimed at creating breaks for the ball carrier,⁶ and breaking tackles.⁷ Producing high running velocities^{8,9} and reactive changes in velocity (ie, acceleration/deceleration and thus force)^{3,10} regardless of the player's position appear to be the key factors for rugby union performance.

During sprinting, the horizontal force production capacity on the ground is considered a strong indicator of acceleration performance.^{11,12} In collision events, the athletes push forward to make their opponent move back; this involves the ability to produce and apply a greater horizontal force on the ground than during sprinting because of the lower velocity and may be compared with a resisted sprint.¹³ van Rooyen et al¹⁴ have demonstrated that a forward leaning and obliquely angled position of the player's torso before contact was related to the tackle efficiency in international rugby union while executing front-on tackles reduced offloads and tackle breaks for the ball carrier.¹⁵ In both situations, the player has to produce the maximum thrust in a horizontal direction. Samozino et al¹⁶ proposed a reliable method for measuring, through the horizontal force-velocity (FV) relationship, the athlete's ability to produce a net horizontal force during sprinting over a wide range of running velocities. The sprint FV relationship is characterized by the theoretical maximum force (F_0), theoretical maximum velocity (V_0), maximum propulsive power (P_{max}) produced during the movement, maximum ratio of horizontal force to resultant force over one step (RF_{max}), and rate of decrease of this ratio of forces with increasing velocity (DRF).^{16,17} The 2 latter variables, important performance factors in sprinting,^{11,18} describe the athlete's mechanical effectiveness of force application, that is, the ability to orient the total force developed in the anteroposterior direction at low velocities and the capacity to maintain it at a high level over the acceleration phase when the velocity increases.

Glaise  <https://orcid.org/0000-0003-1178-8377>

Rogowski  <https://orcid.org/0000-0002-9159-382X>

Samozino  <https://orcid.org/0000-0002-1665-870X>

Morin  <https://orcid.org/0000-0003-3808-6762>

Morel  <https://orcid.org/0000-0002-2872-6423>

Martin (cyril.martin@univ-lyon1.fr) is corresponding author.  <https://orcid.org/0000-0003-3378-5249>

Sprinting FV relationship parameters are influenced by the level of competition. International and professional players have greater F_0 , V_0 , P_{\max} , maximum velocity, and significantly greater RF_{\max} than club-level players, whereas professional players have a greater RF_{\max} than international players.¹⁹ These parameters also depend on the position of the player, as the forwards are slower than the backs²⁰ with a dominant force profile oriented toward higher absolute F_0 values. Tight-five forwards show significantly lower relative F_0 than loose forwards and inside backs.¹⁹ These differences in the mechanics of sprinting according to position may be related to the specific in-game demands of each position due to a greater participation of the forwards in efforts requiring high levels of strength compared with the backs who are more involved in running efforts, including sprints.^{3,21}

Effective training interventions have been proposed to improve the underlying determinant mechanical variables of the FV profile.^{17,22,23} However, until now, horizontal force production capacity assessed during a linear sprint have only been related to linear sprint performance.^{17,22,23} To date, potential links between the FV profile characteristics and specific rugby tasks have never been explored.

Therefore, the purpose of the present study was to examine the relationship between the various parameters of force production capacity in sprinting and key performance indicators in rugby union. For this, we evaluated efficiency in offensive duels, rucks, and tackles by calculating the ratio of successful attempts to total attempts. These observations were made during official competitive games for the whole team and specifically for forwards and backs. Because of the nature of the efforts made in rugby union²⁰ and the velocity of movement of the players during opposition actions,²⁴ the main hypothesis was that skill efficiency—that is, dueling, tackling, and rucking efficiency—would be associated with the production capacity and mechanical effectiveness of horizontal force at low velocities (ie, F_0 and RF_{\max}) for the forwards as well as for the backs, leading to a relationship with P_{\max} oriented toward higher force levels for lower velocities.

Methods

Participants

Thirty-three professional male rugby players (age, 25.6 [4.3] y; height, 184.0 [8.0] cm; body mass, 98.9 [13.9] kg; 4 skinfolds body fat, 16.8% [3.4%]) were included in this study and divided into 2 groups: 20 forwards (age, 26.4 [4.6] y; height, 187.4 [8.0] cm; body mass, 108.1 [7.9] kg; 4 skinfolds body fat, 18.1% [3.5%]) and 13 backs (age, 24.7 [3.7] y; height, 178.8 [4.6] cm; body mass, 85.5 [6.6] kg; 4 skinfolds body fat, 14.8% [2.1%]). The players achieved a training volume of ~20 hours per week (8 rugby sessions, 4 strength and speed development sessions, 1 fitness development session, and 1 official game; weekly average volume during the study: 13,219 [4117] m).

Study Design

This study was based on a retrospective analysis of skill efficiency during 12 consecutive official games from January to May 2019 (each player participated in at least 9 games). Because changes in sprint mechanics may occur during a long period (Jimenez-Reyes et al²⁵), individual sprint FV profiles of the players were evaluated in the middle of the 12 games data collection sequence (in March).

Thus, the 2 sprint test sessions were performed on Thursday mornings of the weeks before the game 6 and 7, after a 42-hour recovery without training. The relationships between components of the FV profile and skill efficiency data were determined according to position (forwards and backs). All participants were informed that these data were collected and may be included in future studies and were free to remove their results from the study at any time.

Horizontal FV Profiling

After a standardized warm-up (5 min of stretching and joint mobilization exercises and 10 min of athletic skills and moderate-intensity running followed by 5 min of graduated accelerations), players performed two 30-m maximal sprints on artificial turf from a standing staggered stance start, with 5-minute passive recovery between sprints. During the sprint, the time was assessed by timing gates (Brower Timing Systems) positioned at the start and at 30 m. Simultaneously, instantaneous velocity data were computed using a validated field method based on running speed measured with a radar device (Stalker ATS Pro II, Applied Concepts) as previously described and validated.^{16,26,27} The radar device was attached to a tripod 5 m behind the start line at a height of 1 m corresponding approximately to the height of the participants' center of mass and handled by a single experienced assessor.

The horizontal force production capacity outputs were obtained using the method of Samozino et al,¹⁶ which is based on an inverse dynamic approach applied to the body center of mass.¹⁶ The step-averaged horizontal external force applied onto the ground in the anteroposterior direction, center of mass velocity, and the propulsive power (the power output associated with the step-averaged horizontal external force) were modeled from instantaneous velocity data measured during the acceleration phase of each sprint. Theoretical relative maximal horizontal force (F_0 , in newtons per kilogram) and theoretical maximal sprinting velocity (V_0 , in meters per second) were then identified as the velocity and force intercepts of the FV relationship, respectively. Relative maximum propulsive power output (P_{\max} , in watts per kilogram) was determined as $(F_0 \times V_0)/4$. The ratio of horizontal force to total force was modeled from 0.3 seconds to the maximal velocity.^{11,16} The maximal ratio of force (RF_{\max}) was the highest value of RF (value of RF at 0.3 s). The slope of the linear RF–velocity relationship represented the decrement in RF (DRF) with increasing speed. The average of the mechanical outputs of the 2 sprints was calculated for all the components of the FV relationship.

Skill Efficiency Data

During each of the 12 official games, individual player activities were recorded by video analysis (Sportscode). Participation in offensive duels, tackles, and rucks was recorded for each player and coded as successful or unsuccessful (dueling, tackling, and rucking efficiency) by a single observer (who was unaware that their coding would be used in the study). Efficiency criteria (Table 1) for these 3 technical skills were developed by 2 expert coaches both with the highest level of qualification issued by the French Rugby Federation. An offensive duel represents an attempt to break the opponent's defensive line performed with the ball in hand. A tackle is an attempt to stop an opponent carrying the ball. A ruck is formed with a tackled player on the ground and 2 opponents in contact fighting for the ball in a standing position. In

Table 1 Criteria Used by Coaches to Assess Skill Efficiency of Rugby Union Players

Skill	Efficiency criteria
Offensive duel	Gain of advantage line, evasion, break, all with the ball in hand
Tackle	Tackle completed in all directions, offensive tackle, gain of the ball, as first or second tackler
Ruck	Gain of ball, gain of space, keep the ball safe

Note: To be coded as effective, players had to meet at least one of these conditions for each skill.

our study, participations in offensive or defensive rucks were considered. The skill efficiency of offensive duels, tackles, and rucks was calculated as the percentage of successful actions relative to total attempted by a player. Skill efficiencies (dueling efficiency, tackling efficiency, and rucking efficiency) were calculated as the mean value of these efficiencies among the games played by each player. The intraobserver reliability was calculated using the intraclass correlation coefficient (ICC). A single rater coded the same game twice 14 months apart. The ICCs reported represent the average of the 2 games analyzed. The intraobserver reliability was very good for dueling efficiency (ICC with 95% confidence interval = .92, .84 to .96; standard error of measurement = 0.04), for rucking efficiency (ICC = .97, .94 to .99; standard error of measurement = 0.03), and for tackling efficiency (ICC = .98, .97 to .96; standard error of measurement = 0.02). Among the 12 games, the variance in duel efficiency, ruck efficiency, and tackle efficiency was 0.014 (0.024), 0.024 (0.029), and 0.025 (0.027), respectively.

Statistical Analysis

The normality and the homoscedasticity of the variables were confirmed for all variables by using the Shapiro–Wilk test and Levene test. Pearson correlation coefficient (r) was used to identify the relationship between FV parameters and skill efficiency. The magnitude of the relationships was determined using the²⁸ following classification: weak (-1 to -0.3 ; 0.1 to 0.3), intermediate (-0.3 to -0.5 ; 0.3 to 0.5), and strong (<-0.5 or >0.5). Then, multiple linear regression analysis was used to determine the extent to which mechanical variables characterizing horizontal force production capacity explained the skill efficiency in the game. Two multiple linear regression models were chosen. The first model was computed to express the skill efficiencies as a function of F_0 and V_0 to observe how the variance in the skills may be explained by low- or high-velocity force application parameters. Then a second model was applied to express the skill efficiencies as a function of RF_{max} and DRF to assess how the variance in the skills may be explained by low- or high-velocity force orientation parameters. For each model, absolute coefficients (b), standardized coefficients (β), and semipartial correlation (r') were calculated to estimate the contributions of each variable to the proposed model. We checked for potential collinearity of variables when using the multiple linear regression models using the variance inflation factor. No collinearity between the variables in our multiple linear regression models were measured as all the values of variance inflation factor were lower than 4, and all the values of tolerance were higher than 0.25. Student t test was applied for measuring differences in sprinting mechanical outputs between forwards and backs. Cohen d was calculated to characterize effect size (0.2: small effect; 0.5: moderate effect; and 0.8: large effect).²⁸ All data are

expressed as mean (SD). All statistical tests were performed using Statistica (version 13.2), and the level of significance was set at $P \leq .05$.

Results

Relationship Between FV Variables and Skill Efficiency

Significant strong correlations were found between P_{max} and skill efficiencies (Table 2). In forwards, P_{max} was significantly correlated with dueling ($r = .75$, $P < .001$), rucking ($r = .86$, $P < .001$), and tackling efficiency ($r = .77$, $P < .001$). In backs, only dueling ($r = .72$, $P = .005$) and tackling ($r = .87$, $P < .001$) efficiency were significantly associated with P_{max} .

Considering the underpinning components of P_{max} , while no significant relationships were observed between skill efficiencies and V_0 (Table 2), F_0 was significantly associated with skill efficiencies. In forwards, strong correlations were found between dueling ($r = .91$, $P < .001$), rucking ($r = .86$, $P < .001$), and tackling ($r = .62$, $P = .003$) efficiencies and F_0 . Similarly, in backs, strong correlations were observed between F_0 and dueling ($r = .82$, $P = .001$), rucking ($r = .71$, $P = .006$), and tackling efficiency ($r = .70$, $P = .007$; Figure 1).

RF_{max} was also significantly strongly associated with the efficiency of duels, tackles, and rucks in both forwards ($r = .87$, $P < .001$; $r = .85$, $P < .001$; and $r = .68$, $P = .001$, respectively) and backs ($r = .80$, $P = .001$; $r = .65$, $P = .016$; and $r = .81$, $P = .001$, respectively; Figure 1).

Other strong relationships were found between DRF and dueling efficiency and rucking efficiency in forwards ($r = -.78$, $P < .001$ and $r = -.58$, $P = .007$, respectively) and backs ($r = -.67$, $P = .012$ and $r = -.75$, $P = .003$, respectively; Table 2).

Predictors of Skill Efficiency in Forwards and Backs

In forwards, the multiple linear regression model including F_0 and V_0 explained 83.1% of the variance in dueling efficiency ($P < .001$), where F_0 was the only significant predictor ($P < .001$) (Table 3). In the model including RF_{max} and DRF, 78.2% of variance in dueling efficiency is explained by these variables ($P < .001$), in which only RF_{max} had a significant effect ($P < .001$). The same results were observed in backs with the model including F_0 and V_0 and the model including RF_{max} and DRF predicting 67.5% ($P = .004$) and 66.3% ($P = .004$) of the variance in dueling efficiency, respectively (Table 4).

In forwards, 82.9% of the variance in rucking efficiency were explained by variations in F_0 and V_0 ($P < .001$), and they were significant predictors ($P < .001$ and $P = .009$, respectively). However, the contribution of F_0 in the model was higher ($r' = .893$) than

Table 2 Pearson Correlations (*r*) Between Skill Efficiency and Sprinting Horizontal Force-Production Capacities in Forwards and Backs

	Duel efficiency	Rucking efficiency	Tackling efficiency
Forwards			
$V_0, \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$			
<i>r</i>	-.17	.17	.35
<i>P</i>	.47	.48	.13
$P_{\text{max}}, \text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$			
<i>r</i>	.75	.86	.76
<i>P</i>	<.001	<.001	<.001
DRF			
<i>r</i>	-.78	-.58	-.28
<i>P</i>	<.001	.007	.22
Backs			
$V_0, \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$			
<i>r</i>	-.01	-.29	.55
<i>P</i>	.961	.343	.050
$P_{\text{max}}, \text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$			
<i>r</i>	.72	.51	.87
<i>P</i>	.005	.078	<.001
DRF			
<i>r</i>	-.67	-.75	-.24
<i>P</i>	.012	.003	.421
Full team			
$V_0, \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$			
<i>r</i>	-.09	-.15	.23
<i>P</i>	.602	.393	.190
$P_{\text{max}}, \text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$			
<i>r</i>	.61	-.07	.18
<i>P</i>	<.001	.669	.317
DRF			
<i>r</i>	-.72	-.10	.04
<i>P</i>	<.001	.591	.821

Abbreviations: DRF, rate of decrease of this ratio of forces with increasing velocity; P_{max} , maximum propulsive power; V_0 , theoretical maximum velocity.

that of V_0 ($r' = .295$). In contrast, in the model including RF_{max} and DRF, RF_{max} was the only significant predictor ($P < .001$), which explained 75.1% ($P < .001$) of the variance in rucking efficiency in forwards. In backs, the model including F_0 and V_0 and the model including RF_{max} and DRF predicted 59.1% ($P = .012$) and 50.7% ($P = .029$) of the variance in rucking efficiency, respectively; F_0 was the only significant predictor ($P = .005$).

In forwards, 57.4% ($P < .001$) and 55.5% ($P = .001$) of the variance in tackling efficiency was explained by variations of F_0 and V_0 as well by variations of RF_{max} and DRF. F_0 and V_0 were significant predictors in the first model ($P < .001$ and $P = .018$, respectively), with a higher contribution of F_0 ($r' = .683$) than that of V_0 ($r' = .416$). In the second model, RF_{max} and DRF were significant predictors ($P < .001$ and $P = .05$, respectively), with a higher contribution of RF_{max} ($r' = .707$) in the model than that of DRF ($r' = .34$). In backs, the model including F_0 and V_0 explained 77.3% of the variance in tackling efficiency ($P < .001$), with a similar contribution of F_0 ($r' = .684$, $P = .001$) and V_0 ($r' = .525$, $P = .006$). Furthermore, the model including RF_{max} and DRF

explained 74.5% of the variance in tackling efficiency ($P = .001$), with RF_{max} being the only significant predictor ($P < .001$).

Components of the Sprint FV Profile According to Position

While V_0 did not differ between forwards and backs, F_0 , P_{max} , and RF_{max} were significantly higher in backs than in forwards ($P < .001$ and large effect for all; Table 5). Conversely, DRF was significantly lower in backs than in forwards ($P = .01$, large effect).

Discussion

This study aimed to determine whether the players' efficiency of offensive duels, rucks, and tackles during official rugby union competitive games was associated with their horizontal force production capacity. The main findings were that all the skill efficiency criteria were strongly correlated with P_{max} and were

(Ahead of Print)

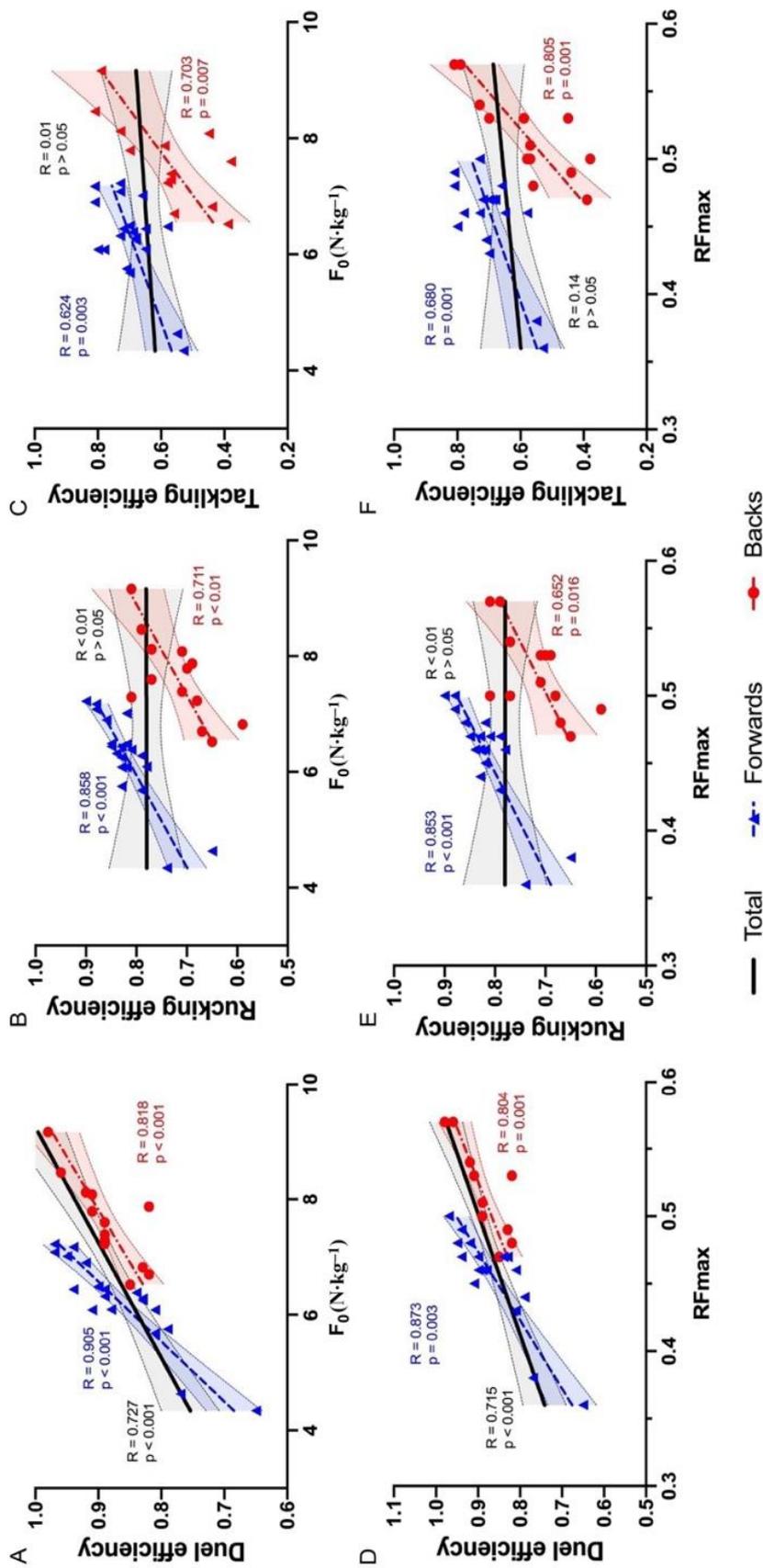


Figure 1 — Relationships between components of the sprint force–velocity profile and skill efficiency: (A) relationship between duel efficiency and F_0 according to position, (B) relationship between rucking efficiency and F_0 according to position, (C) relationship between tackling efficiency and F_0 according to position, (D) relationship between duel efficiency and RF_{max} according to position, (E) relationship between rucking efficiency and RF_{max} according to position, and (F) relationship between tackling efficiency and RF_{max} according to position. Bold lines represent the correlation lines for all players (including forwards and backs). The shaded spaces between the thin lines represent the 95% CI. F_0 indicates theoretical maximum force; RF_{max}: maximum ratio of horizontal force to resultant force over 1 step.

Table 3 Multiple Linear Regression in Forwards

Skill	Models	R ²	F _{2,17}	P	Var	b	β	t	P
Duel efficiency	F ₀ —V ₀	.831	41.81	<.001	F ₀	0.096	0.904	8.985	<.001*
					V ₀	-0.006	-0.048	-0.478	.639
	RF _{max} —DRF	.782	30.44	<.001	RF _{max}	1.589	0.700	4.322	<.001*
					DRF	-1.715	-0.236	-1.547	.163
Rucking efficiency	F ₀ —V ₀	.829	41.23	<.001	F ₀	0.066	0.902	8.910	<.001*
					V ₀	0.026	0.298	2.943	.009*
	RF _{max} —DRF	.751	25.62	<.001	RF _{max}	1.590	1.016	5.872	<.001*
					DRF	1.155	0.230	1.332	.200
Tackling efficiency	F ₀ —V ₀	.574	11.44	<.001	F ₀	0.072	0.690	4.316	<.001*
					V ₀	0.054	0.420	2.628	.051
	RF _{max} —DRF	.555	10.58	<.001	RF _{max}	2.267	1.010	4.365	<.001*
					DRF	3.497	0.486	2.102	.051

Abbreviations: DRF, rate of decrease of this ratio of forces with increasing velocity; F₀, theoretical maximum force; RF_{max}, maximum ratio between horizontal force and resultant force over 1 step; V₀, theoretical maximum velocity; Var, variable.

*P < .05.

Table 4 Multiple Linear Regression in Backs

Skill	Models	R ²	F _{2,10}	P	Var	b	β	t	P
Duel efficiency	F ₀ —V ₀	.675	10.36	.004	F ₀	0.055	0.822	4.551	<.001*
					V ₀	-0.006	-0.055	0.304	.767
	RF _{max} —DRF	.663	9.81	.004	RF _{max}	0.979	0.619	2.490	.032*
					DRF	-1.323	-0.256	1.027	.328
Rucking efficiency	F ₀ —V ₀	.591	7.21	.012	F ₀	0.065	0.719	3.549	.005*
					V ₀	-0.044	-0.303	1.494	.166
	RF _{max} —DRF	.507	5.14	.029	RF _{max}	0.690	0.325	1.082	.305
					DRF	-3.135	-0.451	1.501	.164
Tackling efficiency	F ₀ —V ₀	.773	17.00	<.001	F ₀	0.132	0.684	4.536	.001*
					V ₀	0.166	-0.525	3.481	.006*
	RF _{max} —DRF	.745	14.60	.001	RF _{max}	4.940	1.083	5.006	<.001
					DRF	6.055	-0.405	1.874	.090*

Abbreviations: DRF, rate of decrease of this ratio of forces with increasing velocity; F₀, theoretical maximum force; RF_{max}, maximum ratio between horizontal force and resultant force over 1 step; V₀, theoretical maximum velocity; Var, variable.

*P < .05.

Table 5 Components of the Sprint Force–Velocity Profile According to Positional Group

	Forwards n = 20	Backs n = 13	Student t test
F ₀ , N·kg ⁻¹	6.30 (0.75)*	7.62 (0.74)	Cohen d (1, 31) = 1.826, P < .001 (95% CI, 0.82 to 1.90)
V ₀ , m·s ⁻¹	8.75 (0.61)	9.017 (0.45)	Cohen d (1, 31) = 0.474, P = .193 (95% CI, -0.14 to 0.67)
P _{max} , W·kg ⁻¹	13.67 (1.75)*	17.18 (1.92)	Cohen d (1, 31) = 1.928, P < .001 (95% CI, 2.19 to 4.83)
RF _{max}	0.46 (0.04)*	0.52 (0.03)	Cohen d (1, 31) = 1.75, P < .001 (95% CI, 0.04 to 0.08)
DRF	-0.07 (0.01)*	-0.08 (0.01)	Cohen d (1, 31) = 0.927, P = .01 (95% CI, -0.02 to -0.01)

Abbreviations: DRF, rate of decrease of this ratio of forces with increasing velocity; F₀, theoretical maximum force; P_{max}, maximum propulsive power; RF_{max}, maximum ratio between horizontal force and resultant force over one step; V₀, theoretical maximum velocity.

*Significantly different from backs (P < .05).

mainly explained by horizontal force production capacity and mechanical effectiveness at low (F_0 and RF_{\max}) velocities.

The observed significant relationships between maximum propulsive power during sprinting and mechanical effectiveness for forwards and backs confirm the findings of previous studies that lower limb power output influences skill performance, such as the number of evasions and tackle breaks in rugby union forward players²⁹ or evasion skill in rugby league players.⁷ The present study is the first, to our knowledge, to propose to distinguish between force capacities at low and high velocities underlying maximum power. Skill efficiency was not correlated with force production capacity at high velocity but to the production and the application effectiveness of the horizontal force at low velocity (significant contribution of F_0 and RF_{\max} compared with that of V_0 and DRF). The more the player is able to develop and orient a high level of horizontal force at the start of a sprint, the higher his skill efficiency is. This finding confirms that acceleration mainly depends on maximal horizontal power and on the FV profile, which should be oriented toward force application capabilities over short sprint distances³⁰ and indicates that success in key actions in the game (defined by the 3 skill efficiencies) is determined by short-distance acceleration performance and associated force production capabilities.

F_0 is defined as the theoretical maximal horizontal force production extrapolated from the linear sprint FV relationship. It represents maximal force output in the horizontal direction corresponding to the initial push by the athlete onto the ground during sprint acceleration.¹⁶ Despite the differences in FV profile between positions (Table 5), having a high horizontal force production is a major determinant of sprint acceleration, especially over the short distances that rugby union players mostly encounter.³¹ Our data show that F_0 was a strong predictor of dueling efficiency in the entire population as well as separately in forwards and backs (as the F_0/V_0 model explains between 57.4% and 83.1% of the variance in skill efficiency forwards and between 59.1% and 77.3% of this variance in backs, F_0 being the only or the main contributor of these variances). The higher the F_0 , the more successful the players are in gaining advantage line, break, or evade, regardless of the playing position. Notably, although F_0 was not correlated with rucking and tackling efficiency when considering the overall player population, F_0 was observed to be a strong predictor of these skills in forwards as well as in backs when considering these positions separately.

A previous study reported that sprint performance over a short distance (10 m), but not over longer distances (20 m for forwards and 30 m for backs), was associated with the production of line breaks and tackle breaks in rugby union players.²⁹ In addition, the running velocity of the ball carrier would be associated with a greater number of breaks⁶ when the impulse of the ball carrier's leg increases the probability of breaking the tackle in international as in championship rugby union players.¹⁵ Our findings support these results and suggest that rugby union is a sport with a predominance of short acceleration over maximum speed phases; however, in the present study, the number of running evasions were correlated with sprint performance on both distances.²⁹

Thus, F_0 appears to be a key factor for rugby union performance and may, therefore, be an important skill to develop during training. Several techniques such as heavy resistance sprint training over short distances²³ induced, for example, by heavy sled loads³² have been shown to improve short sprint performance and F_0 and thus should be of interest for rugby union players, independent of their position on the pitch. Our findings also suggest that F_0 and V_0 contribute similarly to tackling efficiency in backs. These results

may be explained by the velocity at which the backs perform tackles. To be effective, tacklers adjust their speed according to the ball carrier,³³ which is typically a moderate speed for the backs. During side-on tackles, backs have a higher velocity than the forwards (5.5 [2.1] $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ vs 3.7 [1.1] $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively), but no difference in velocity has been detected between forwards and backs for front tackles (5.8 [2.3] $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ vs 5.6 [1.9] $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); however, it has been shown that the magnitude of impact in front-on tackles is higher compared with side-on tackles²⁴ showing that the external forces applied are more important in front-on tackles. Thus, it seems reasonable that F_0 and V_0 make equivalent contributions because these velocities correspond to the maximum power zone.

The ability to produce propulsive force is also a key factor for rugby union-specific skills. RF_{\max} corresponds to the maximal effectiveness of force application (ie, at sprint start¹⁶) and is one of the main factors underlying F_0 . In the present study, we showed that RF_{\max} is a significant predictor of dueling (78.2% of its variance), rucking (75.1% of its variance), and tackling efficiency (55.5% of its variance) in forwards and of dueling (66.3% of its variance) and tackling efficiency (74.5% of its variance) in backs. The more the player is able to direct the force produced onto the ground horizontally backward, the more effective he is in the opposition phases. These results confirm the importance of applying horizontal force to be effective in team sports in which orientation of the force applied onto the ground has been shown to be a critical determinant of sprint acceleration^{11,12} and may be related to the number of defenders beaten and dominant tackles in rugby sevens players.³⁴ Improving RF_{\max} should therefore also be a goal for rugby union players. For example, heavy sled training programs have been shown to improve RF_{\max} in soccer players,²² confirming that the ability to apply horizontal force during intense effort is an essential factor of performance in rugby union where the fundamental objective is to move forward.

Another interesting point highlighted by our study is that horizontal force production capacities assessed during a linear sprint are strongly correlated with performances in key performance indicator in competitive situations. While the majority of studies have linked different sprint mechanical parameters assessed in a straight line to straight-line performance,³⁵ our study shows that there is a transfer between horizontal force application abilities in sprinting and the ability to beat an opponent in competitive situations that use change of direction or collision. These finding highlights that the FV relationship in sprinting assesses force production capacities in a general manner and do not reflect only the ability to run fast in a straight line.

However, in most of our analyses, V_0 and DRF were not significant predictors. These results may be explained (1) by the activity of rugby union, which is more a sport of acceleration than maximum velocity²¹ and (2) by the skills studied; except for duels (where breaks were taken into consideration), rucks and tackles are performed with low to moderate speeds, which explains that their skills efficiencies were not related to the parameters of force application at high velocities. Other research could be interesting to realize by using the same statistical models with skills more oriented on the maximum velocity as kick and chase or breaks.

The major limitation of this retrospective analysis is that it investigated sprint force application performance over a single assessment period, in the middle of a 12-game window in a single sports season. Therefore, it is necessary keep in mind that the mechanical components of the FV profile in sprinting may fluctuate during a rugby season as they do during a football season²⁵ and also vary according to the training content.^{23,36} In addition, some

(Ahead of Print)

relationships may be strengthened or attenuated by individual variations. For example, in Figure 1, individuals with similar F_0 performance can be found with different skill efficiency and can be explained by many hypotheses such as a very different initial skill level or a counter performance in the sprint measurement. Another limitation can be questioned because this study related physical performance factors with technical performance. However, we know that the skill efficiency can be influenced by technical factors as well. For example, in the ruck, although technical efficiency is clearly related to the application of horizontal force, it is also dependent on the activity of the ground of the tackled player to placing the ball while in tackle, a head up and forward position and a collision made with the shoulder on the mid-torso of the ball carrier were the main characteristics of the tackle associated with a positive tackle outcome in a game.²⁴ Similarly, the positioning of the ball receiver, as well as the quality of the pass preceding the duel, can increase the probability of breaking the line.¹⁵

Practitioners could focus on the development of P_{\max} in sprinting and should try to improve it by increasing the production and orientation of horizontal force in low-speed conditions. For this, the training methods of resisted sprint and heavy sled push have already shown effective results, which could improve the technical efficiency of the players on opposition actions in rugby union.³²

In conclusion, this study shows clear associations between components of the FV profile in sprinting and skill efficiency in rugby union players. Efficiency in duels, rucks, and tackles depends on the ability of the players to develop and orient horizontal force during a sprint. Analysis of the sprint FV profile (especially F_0 and RF_{\max}) of rugby union players may thus be valuable for strength and conditioning coaches to better orient development objectives and evaluate the results of these programs. Future interventional studies aimed at developing these parameters and assessing their impact on performance are warranted.

Acknowledgments

This study was carried out within the framework of a CIFRE (Industrial agreement on training through research) agreement thesis and was supported by the French National Association for Research and Technology.

References

1. Deutsch MU, Kearney GA, Rehrer NJ. Time-motion analysis of professional rugby union players during match-play. *J Sports Sci.* 2007;25(4):461–472. PubMed ID: 17365533 doi:10.1080/02640410600631298
2. Takamori S, Hamlin MJ, Kieser DC, et al. Senior club-level rugby union player's positional movement performance using individualized velocity thresholds and accelerometer-derived impacts in matches. *J Strength Cond Res.* 2020;36(3):710–716. doi:10.1519/JSC.0000000000003523
3. Cunniffe B, Proctor W, Baker JS, Davies B. An evaluation of the physiological demands of elite rugby union using Global Positioning System tracking software. *J Strength Cond Res.* 2009;23(4):1195–1203. PubMed ID: 19528840 doi:10.1519/JSC.0b013e3181a3928b
4. Quarrie KL, Hopkins WG. Changes in player characteristics and match activities in Bledisloe Cup rugby union from 1972 to 2004. *J Sports Sci.* 2007;25(8):895–903. PubMed ID: 17474043 doi:10.1080/02640410600944659
5. Dubois R, Bru N, Paillard T, et al. Rugby game performances and weekly workload: using of data mining process to enter in the complexity. *PLoS One.* 2020;15(1):e0228107. PubMed ID: 31995600 doi:10.1371/journal.pone.0228107
6. den Hollander S, Brown J, Lambert M, Treu P, Hendricks S. Skills associated with line breaks in elite rugby union. *J Sports Sci Med.* 2016;15:501–508. PubMed ID: 27803629
7. Gabbett T, Kelly J, Pezet T. Relationship between physical fitness and playing ability in rugby league players. *J Strength Cond Res.* 2007;21:1126–1133. PubMed ID: 18076242 doi:10.1519/r-20936.1
8. Gabbett TJ, Jenkins DG, Abernethy B. Physical demands of professional rugby league training and competition using microtechnology. *J Sci Med Sport.* 2012;15(1):80–86. PubMed ID: 21820959 doi:10.1016/j.jsams.2011.07.004
9. Duthie GM, Pyne DB, Marsh DJ, Hooper SL. Sprint patterns in rugby union players during competition. *J Strength Cond Res.* 2006;20:208–214. PubMed ID: 16506864 doi:10.1519/r-16784.1
10. Quarrie KL, Hopkins WG, Anthony MJ, Gill ND. Positional demands of international rugby union: evaluation of player actions and movements. *J Sci Med Sport.* 2013;16(4):353–359. PubMed ID: 22975233 doi:10.1016/j.jsams.2012.08.005
11. Morin JB, Edouard P, Samozino P. Technical ability of force application as a determinant factor of sprint performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2011;43(9):1680–1688. PubMed ID: 21364480 doi:10.1249/MSS.0b013e318216ea37
12. Morin JB, Bourdin M, Edouard P, Peyrot N, Samozino P, Lacour JR. Mechanical determinants of 100-m sprint running performance. *Eur J Appl Physiol.* 2012;112(11):3921–3930. PubMed ID: 22422028 doi:10.1007/s00421-012-2379-8
13. Pantoja PD, Carvalho AR, Ribas LR, Peyre-Tartaruga LA. Effect of weighted sled towing on sprinting effectiveness, power and force-velocity relationship. *PLoS One.* 2018;13(10):e0204473. PubMed ID: 30289907 doi:10.1371/journal.pone.0204473
14. van Rooyen M, Yasin N, Viljoen W. Characteristics of an 'effective' tackle outcome in six nations rugby. *Eur J Sport Sci.* 2014;14(2):123–129. PubMed ID: 24533518 doi:10.1080/17461391.2012.738710
15. Hendricks S, Till K, Brown JC, Jones B. Rugby union needs a contact skill-training programme. *Br J Sports Med.* 2017;51(10):829–830. PubMed ID: 27821386 doi:10.1136/bjsports-2016-096347
16. Samozino P, Rabita G, Dorel S, et al. A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. *Scand J Med Sci Sports.* 2016;26(6):648–658. PubMed ID: 25996964 doi:10.1111/sms.12490
17. Morin JB, Samozino P. Interpreting power-force-velocity profiles for individualized and specific training. *Int J Sports Physiol Perform.* 2016;11(2):267–272. PubMed ID: 26694658 doi:10.1123/ijspp.2015-0638
18. Rabita G, Dorel S, Slawinski J, et al. Sprint mechanics in world-class athletes: a new insight into the limits of human locomotion. *Scand J Med Sci Sports.* 2015;25(5):583–594. PubMed ID: 25640466 doi:10.1111/sms.12389
19. Watkins CM, Storey A, McGuigan MR, Downes P, Gill ND. Horizontal force-velocity-power profiling of rugby players: a cross-sectional analysis of competition-level and position-specific movement demands. *J Strength Cond Res.* 2021;35:1576–1585. PubMed ID: 33927113 doi:10.1519/jsc.0000000000004027
20. Cross MR, Brughelli M, Brown SR, et al. Mechanical properties of sprinting in elite rugby union and rugby league. *Int J Sports Physiol Perform.* 2015;10(6):695–702. PubMed ID: 25310279 doi:10.1123/ijspp.2014-0151
21. Cahill N, Lamb K, Worsfold P, Headey R, Murray S. The movement characteristics of English Premiership rugby union players. *J Sports*

- Sci.* 2013;31(3):229–237. PubMed ID: 23009129 doi:10.1080/02640414.2012.727456
22. Lahti J, Huuhka T, Romero V, Bezodis I, Morin JB, Hakkinen K. Changes in sprint performance and sagittal plane kinematics after heavy resisted sprint training in professional soccer players. *PeerJ*. 2020;8:e10507. PubMed ID: 33362970 doi:10.7717/peerj.10507
 23. Lahti J, Jimenez-Reyes P, Cross MR, et al. Individual sprint force-velocity profile adaptations to in-season assisted and resisted velocity-based training in professional rugby. *Sports*. 2020;8(5):74. doi:10.3390/sports8050074
 24. Hendricks S, Karpul D, Lambert M. Momentum and kinetic energy before the tackle in rugby union. *J Sci Med Sport*. 2014;13:557–563. PubMed ID: 25177182
 25. Jimenez-Reyes P, Garcia-Ramos A, Parraga-Montilla JA, et al. Seasonal changes in the sprint acceleration force-velocity profile of elite male soccer players. *J Strength Cond Res*. 2022;36:70–74. PubMed ID: 32329976 doi:10.1519/jsc.0000000000003513
 26. Morin JB, Samozino P, Murata M, Cross MR, Nagahara R. A simple method for computing sprint acceleration kinetics from running velocity data: replication study with improved design. *J Biomech*. 2019;94:82–87. PubMed ID: 31376978 doi:10.1016/j.jbiomech.2019.07.020
 27. Simperingham KD, Cronin JB, Pearson SN, Ross A. Reliability of horizontal force-velocity-power profiling during short sprint-running accelerations using radar technology. *Sports Biomech*. 2019;18(1):88–99. PubMed ID: 29125040 doi:10.1080/14763141.2017.1386707
 28. Cohen J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Routledge. 10.4324/9780203771587.
 29. Smart D, Hopkins WG, Quarrie KL, Gill N. The relationship between physical fitness and game behaviours in rugby union players. *Eur J Sport Sci*. 2014;14(suppl 1):S8–S17. doi:10.1080/17461391.2011.635812
 30. Samozino P, Peyrot N, Edouard P, et al. Optimal mechanical force-velocity profile for sprint acceleration performance. *Scand J Med Sci Sports*. 2022;32(3):559–575. PubMed ID: 34775654 doi:10.1111/sms.14097
 31. Deutsch MU, Maw GJ, Jenkins D, Reaburn P. Heart rate, blood lactate and kinematic data of elite colts (under-19) rugby union players during competition. *J Sports Sci*. 1998;16(6):561–570. PubMed ID: 9756260 doi:10.1080/026404198366524
 32. Cahill MJ, Oliver JL, Cronin JB, et al. Influence of resisted sled-pull training on the sprint force-velocity profile of male high-school athletes. *J Strength Cond Res*. 2020;34(10):2751–2759. PubMed ID: 32773545 doi:10.1519/JSC.0000000000003770
 33. Hendricks S, Karpul D, Nicolls F, Lambert M. Velocity and acceleration before contact in the tackle during rugby union matches. *J Sports Sci*. 2012;30(12):1215–1224. PubMed ID: 22853045 doi:10.1080/02640414.2012.707328
 34. Ross A, Gill N, Cronin J, Malcata R. The relationship between physical characteristics and match performance in rugby sevens. *Eur J Sport Sci*. 2015;15(6):565–571. PubMed ID: 25868066 doi:10.1080/17461391.2015.1029983
 35. Cahill MJ, Oliver JL, Cronin JB, Clark KP, Cross MR, Lloyd RS. Sled-pull load-velocity profiling and implications for sprint training prescription in young male athletes. *Sports*. 2019;7(5):119. doi:10.3390/sports7050119
 36. Morin JB, Petrakos G, Jimenez-Reyes P, Brown SR, Samozino P, Cross MR. Very-heavy sled training for improving horizontal-force output in soccer players. *Int J Sports Physiol Perform*. 2017;12(6):840–844. PubMed ID: 27834560 doi:10.1123/ijspp.2016-0444

Discussion et perspectives

La puissance propulsive maximale est fortement corrélée à l'efficacité de tous les efforts de contact chez les avants comme chez les arrières. Ces analyses sont cohérentes avec les résultats avancés dans des études précédentes (Gabbett et al., 2007, Smart et al., 2014) et confirment que **plus le joueur est capable de développer et d'orienter un niveau élevé de force horizontale au début d'un sprint, plus son efficacité dans les efforts de contact est élevée**. Plus précisément, pour les avants, les variances dans l'efficacité du duel, du ruck et du plaquage étaient principalement prédites par F_0 et RF_{max} . Chez les arrières, les variances dans l'efficacité du duel et du ruck étaient principalement déterminées par F_0 , tandis que l'efficacité en duel et en plaquage était également influencée par RF_{max} . L'efficacité du plaquage était déterminée similairement par F_0 et V_0 . En accord avec la littérature, ces données montrent (Den hollander et al., 2016, Hendricks et al., 2017) **que plus le joueur est capable de développer et d'orienter un niveau élevé de force horizontale dans des conditions de vitesse basse, plus son efficacité technique dans les efforts de contact est élevée**.

A l'inverse, dans la plupart de nos analyses, V_0 et DRF n'étaient pas des prédicteurs significatifs. Ces résultats peuvent s'expliquer (i) par l'activité du rugby à XV, qui est plus un sport d'accélération que de vitesse maximale, et (ii) par les efforts de contact étudiés ; à l'exception des duels (où les pauses ont été prises en compte), les rucks et les plaquages sont effectués à des vitesses faibles à modérées, ce qui explique que l'efficacité du joueur lors de ces phases de jeu ne soit pas liée aux paramètres d'application de la force à des vitesses élevées.

Ces résultats confirment que l'accélération dépend principalement de la puissance horizontale maximale et du profil FV , qui devrait être orienté vers les capacités importantes d'application de la force à basse vitesse (F_0 , RF_{max}) (Samozino et al., 2022). Ainsi, le succès dans les actions de contact est déterminé par la performance d'accélération sur courte distance et les capacités de production de force associées quel que soit le poste de jeu.

Bien que cette étude soit la première à démontrer des relations entre les capacités de production de force d'un joueur en sprint et ses performances en situation écologique, il serait intéressant de reproduire des analyses similaires avec un plus grand

échantillon et un plus grand nombre d'observations pour limiter l'influence des stratégies et du profil de l'équipe étudiée, ainsi que pour réduire la variabilité du profil FV qui évolue au cours d'une saison (Jimenez-Reyes et al., 2022). Une analyse incluant des actions clés de la performance en rugby à XV qui nécessitent davantage de vitesse élevée (comme les coups d'envois ou les franchissements) pourrait être envisagée.

Axe 2 : Répéter les efforts de haute intensité

Étude 2. Influence de la capacité à répéter des sprints sur les profils d'activité en match des joueurs de rugby semi-professionnels en fonction de leurs postes.

Problématique

Le rugby à XV est un sport caractérisé par des efforts de haute intensité, tels que des sprints, des accélérations et des efforts de contact avec des périodes de récupération courtes et incomplètes (Roberts et al., 2008 ; Austin et al., 2011). De plus, ces profils d'activité sont fortement dépendants du poste du joueur (Austin et al., 2011). Il est établi que les avants sont davantage impliqués dans des actions de combat nécessitant une intensité maximale de très courte durée (<10") (Cuniffe et al., 2009). Ils produisent plus d'activités de haute intensité (HIA) (Roberts et al., 2008 ; Doutreloux et al., 2002), d'impacts (Coughlan et al., 2011 ; Suárez-Arrones et al., 2012) par rapport aux arrières. A l'inverse, ces derniers effectuent davantage de courses à haute intensité (Coughlan et al., 2011 ; Austin et al., 2013), de sprints (Suárez-Arrones et al., 2012 ; Gabbett et al., 2012), d'accélérations intenses (Cunningham et al., 2016) et atteignent une vitesse maximale plus élevée que les avants (Cahill et al., 2013). Dans ce contexte, les joueurs doivent développer leur capacité à répéter des sprints (RSa) (Girard et al., 2011). Il a été démontré que la RSa est un facteur déterminant de performance dans les sports collectifs comme le rugby à XV (Gabbett et al., 2011). Un niveau élevé de RSa est associé à une plus grande distance parcourue à haute vitesse

et à un ratio d'activité (nombre d'action par unité de temps) plus élevé (Gabbett et al., 2011, Smart et al., 2014). Jusqu'à présent et à notre connaissance, seules deux études ont exploré la relation entre la RSa et la performance en compétition dans le rugby, ce qui apporte un nombre limité de connaissances et des informations incomplètes. Le but de cette étude est donc de déterminer comment la RSa des joueurs de rugby est associée à leurs performances en match (courues et combattues) en fonction de leurs postes de jeu.

Méthodes

Pour répondre à cette problématique, nous avons réalisé une analyse rétrospective de 18 matchs consécutifs. 33 joueurs ont été répartis en deux sous-groupes de postes (20 avants, 13 arrières) ou en quatre sous-groupes de postes (13 cinq de devant, 7 troisième ligne, 6 arrières intérieurs et 7 arrières extérieurs). Leur RSa (12x20m sprint départ toutes les 20s), leur VMA intermittente (30-15 IFT) et leur vitesse linéaire (sprint 30m) ont été mesurées. En parallèle, les données de déplacement en match (analyses issues de données GPS : distance, accélération $>3\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, nombre de sprints $>25\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, vitesse maximale et course à haute vitesse) et les données techniques ont été recueillies lors des 18 matchs afin de déterminer les profils d'activité. Une analyse corrélacionnelle de Spearman a été appliquée pour identifier les relations entre les variables sélectionnées.



Influence of Repeated-Sprint Ability on the in-Game Activity Profiles of Semiprofessional Rugby Union Players According to Position

Paul Glaise^{1,2}, Baptiste Morel³, Isabelle Rogowski¹, Brice Cornu² and Cyril Martin^{1*}

¹ Inter-University Laboratory of Human Movement Biology (LIBM EA7424), University Claude Bernard Lyon, Lyon, France, ² Union Sportive Bressane Pays de l'Ain (USBPA Rugby), Bourg-en-Bresse, France, ³ Inter-University Laboratory of Human Movement Biology (LIBM EA7424), University Savoie Mont-Blanc, Chambéry, France

OPEN ACCESS

Edited by:

Jaime Fernandez Fernandez,
Universidad de León, Spain

Reviewed by:

Tomás T. Freitas,
Universidad Católica San Antonio de
Murcia, Spain
Santiago Zabaloy,
Universidad de Flores, Argentina

*Correspondence:

Cyril Martin
cyril.martin@univ-lyon1.fr

Specialty section:

This article was submitted to
Elite Sports and Performance
Enhancement,
a section of the journal
Frontiers in Sports and Active Living

Received: 18 January 2022

Accepted: 28 March 2022

Published: 25 April 2022

Citation:

Glaise P, Morel B, Rogowski I,
Cornu B and Martin C (2022)
Influence of Repeated-Sprint Ability on
the in-Game Activity Profiles of
Semiprofessional Rugby Union
Players According to Position.
Front. Sports Act. Living 4:857373.
doi: 10.3389/fspor.2022.857373

This study investigated the influence of repeated-sprint ability (RSA) on the activity of rugby union players in a competitive situation according to their position. Thirty-three semiprofessional rugby union players (age, 25.6 ± 4.3 ; height, 184.0 ± 8.0 cm; weight, 98.9 ± 13.9 kg, ~ 20 h training a week), divided into two position subgroups (forwards $n = 20$, backs $n = 13$) or four positional subgroups (front row and locks $n = 13$, back row $n = 7$, inside backs $n = 6$, outside backs $n = 7$), were tested. Their RSA was assessed with a 12×20 m sprint test over a 20 s cycle. GPS data (distance, acceleration, number of sprints, maximum velocity, and high-velocity running) and technical data were collected on 18 semiprofessional division rugby union games. In forwards, players with lower cumulated sprint time in the RSA test produced significantly more accelerations ($\rho = -0.85$, $p < 0.001$) and more combat actions per match minute ($\rho = -0.69$, $p < 0.001$). In backs, RSA was significantly correlated with high-intensity running [distance ($\rho = -0.76$), V_{\max} ($\rho = -0.84$), sprints frequency ($\rho = -0.71$), high-velocity running ($\rho = -0.76$), all $p < 0.01$]. Then, the players were divided into four subgroups (front row and locks, back row, inside backs and outside backs). RSA was significantly associated with the number of accelerations ($\rho = -0.96$, $p < 0.001$) and combat actions in front row and locks ($\rho = -0.71$, $p = 0.007$). In the back row, RSA was correlated with distance ($\rho = -0.96$, $p = 0.003$) and the frequency of combat actions ($\rho = -0.79$, $p = 0.04$). In inside backs, RSA was significantly (all $p < 0.01$) correlated with distance ($\rho = -0.81$), number of accelerations ($\rho = -0.94$) and high-velocity running ($\rho = -0.94$), while in outside backs, RSA was associated with sprint frequency ($\rho = -0.85$) and the maximal in-game velocity reached ($\rho = -0.89$). These results demonstrate that RSA is associated with match running and combat activity performance (i) regardless of the position on the pitch and (ii) specifically for each player's position by improving the corresponding activity profile.

Keywords: high intensity, key performance indicators, movement characteristics, RSA, rugby

INTRODUCTION

Rugby union is an intermittent sport with high-intensity collisions and running evasions, leading to combat situations (maul, ruck, tackle, and impact) and running phases (Deutsch et al., 2007). Rugby requires the repetition of high-intensity force- and velocity-dependent tasks interspersed with recovery phases of random duration and intensity, which are often incomplete (Gabbett et al., 2012; Morel et al., 2015). Thus, high-intensity efforts represent an important part of the efforts in rugby union for all players (Austin et al., 2011a). Game cumulated high-intensity time represents 9–19-min for forwards and 3–7-min for backs (Roberts et al., 2008; Austin et al., 2011a). The ball in play demand is about $108.6 \pm 8.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, 0.8 ± 0.2 accelerations per minute ($>3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) and 0.8 ± 0.3 collisions per minute (Pollard et al., 2018). On average, this represents up to $\sim 45\%$ of the ball-in-play time spent at intensities close to the maximal heart rate (i.e., $>90\%$) (Cunniffe et al., 2009; Sparks and Coetzee, 2013).

In rugby union, players perform different types of maximum efforts, such as sprints, accelerations, tackles, and rucks. Those activity types are highly dependent on the player's position (Austin et al., 2011a) at any level of competition (Takamori et al., 2020; Fornasier-Santos et al., 2021). Most studies divide the players into two positional groups: forwards and backs. Forwards are generally divided into more specific positional roles such as front row, locks, and back row (Zabaloy et al., 2021). Forwards are generally involved in combat actions, such as scrums, tackles or rucks, requiring a maximum or near maximum intensity (Cunniffe et al., 2009). Their total running distance is lower compared to backs (Doutreloux et al., 2002; Roberts et al., 2008; Cunniffe et al., 2009; Austin et al., 2011a; Gabbett et al., 2012; Sparks and Coetzee, 2013; Morel et al., 2015). Thus, forwards produce more repeated high-intensity exercise (RHIE; >3 maximum-intensity efforts interspersed with <21 s rest periods assessed by time-motion analysis) (Austin et al., 2011b, 2013) than backs. Jones et al. (2015) identified the key performance indicators (KPI) in forwards being the number and efficiency of combat actions including tackles, rucks and duels and intense accelerations (Jones et al., 2006). However, among forwards, the activity of the front row and locks differs from that of the back row (Austin et al., 2011a, 2013); total distance and high intensity distance in back row has been shown to be higher than in front row and locks (Cahill et al., 2013).

In-match demands for the backs are different since they complete more high-intensity distance runs ($7.4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ above $18\text{--}20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) (Austin et al., 2011b, 2013; Coughlan et al., 2011; Suárez-Arrones et al., 2012), high accelerations ($5.7\text{--}3$ accelerations $>3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) (Cunningham et al., 2016) and high-velocity running ($>20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) (Doutreloux et al., 2002; Coughlan et al., 2011; Gabbett et al., 2012; Suárez-Arrones et al., 2012) and reach a higher maximum velocity than the forwards (26.3 vs. $30.2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ median maximum velocity in forwards compared to backs) (Cahill et al., 2013). In this sense, Backs are generally categorized into two subgroups (inside backs and outside backs), whose activity has also been shown to differ (higher sprint distance and velocity in outside backs compared with inside back) (Cahill et al., 2013).

Repeated-sprint ability (RSA) is defined as the ability to reproduce maximum or near-maximum intensity in brief efforts (<10 s), interspersed with short and incomplete recovery periods (usually <90 s) (Girard et al., 2011). In team sports such as rugby union, the ability to recover and repeat sprints is a fundamental performance factor (Bishop et al., 2011). Better RSA is related, in rugby league, to a greater distance traveled at high velocity for all players (Gabbett et al., 2013), as well as, in rugby union, to higher activity ratio (i.e., the number of actions per time unit) and number of successful tackles in forwards (Smart et al., 2014). Moreover, a better RSA has been shown to be associated with higher RHIE in rugby league (Gabbett et al., 2013).

To date, only two studies have examined the relationship between RSA and performance in rugby competition. The first study examined the relationship between RSA and technical performance in forwards and backs but did not analyze physical match performance (Smart et al., 2014). The second study focused on rugby league players and determined the relationships between RSA and physical match performance, without distinguishing the playing positions (Gabbett et al., 2013).

As suggested above, the activity profile in rugby union is highly dependent on position. Thus, it is crucial to identify whether RSA is related to key performance indicators (KPI), including moving (Distance, accelerations, high-speed running and sprints) and fighting situations (number of collision situations), according to more specific playing positions in rugby union. Therefore, the objective of this study was to analyze the relationship between RSA and game performance in competition according to position and to consider the KPI specific to each position, as defined above. We hypothesized that RSA would be correlated with KPI during competition games and associated with different KPI depending on playing position.

METHODS

Subjects

Thirty-three semiprofessional male rugby union players (age, 25.6 ± 4.3 ; height, 184.0 ± 8.0 cm; weight, 98.9 ± 13.9 kg; 4 skinfolds body fat, $16.8 \pm 3.4\%$), competing in a semiprofessional division, were included in this study and divided into two groups: 20 forwards (height, 187.4 ± 8.0 cm; weight, 108.1 ± 7.9 kg; 4 skinfolds body fat, $18.1 \pm 3.5\%$) and 13 backs (height, 178.8 ± 4.6 cm; weight, 85.5 ± 6.6 kg; 4 skinfolds body fat, $14.8 \pm 2.1\%$). The players achieved a training volume of $\sim 20 \text{ h}\cdot\text{week}^{-1}$ (eight rugby sessions, four strength and velocity development sessions, one aerobic conditioning development session, and one match).

Study Design

A retrospective analysis was used to study GPS and technical data from 18 consecutive games (game 3 to game 21 of the 2019–2020 Federal 1 Season) and physical test results (30-m sprint time, RSA, and 30–15 intermittent fitness test). These tests were performed in the middle of the championship (on the weeks of games 8, 9, and 10, one test per week) under dry conditions with an average temperature of 13°C over 3 weeks in November. All the tests were performed in the early afternoon. The 30–15 intermittent fitness test (30–15 IFT) and the 30-m sprint test were

performed to put into perspective the results obtained for the RSA. The 30 m sprint test was realized in the first week, then RSA test in the next week and 30–15 IFT in the third week. During test weeks, the training load was reduced to account for assessment tests in the overall load, and ensure that players did not train harder than normal (the month-average training load, monitored by Borg's CR10 scale from September to December ($10,844 \pm 1,916$ A.U. [arbitrary units]), was not significantly different ($p = 0.84$) to the month average of the testing period ($11,225 \pm 1,272$ A.U. [arbitrary units]), and the players were instructed not to consume caffeine 48 h before the tests. All these data were routinely collected by the staff to guide the training program and quantify the training load. The study received institutional ethics approval and used safe procedures for the participants. All players who participated in at least 10 games were included after giving their informed consent. Physical test performances were correlated with GPS and performance data according to position, with (i) a classification within two groups: forwards ($n = 20$) and backs ($n = 13$) and (ii) a classification into four groups: front row and locks (FRL, $n = 13$), back row ($n = 7$), inside backs ($n = 6$) and outside backs ($n = 7$), as used in previous studies (Deutsch et al., 2007; Austin et al., 2011b).

30-M Sprint Test

The 30-m sprint test also was performed around match nine, during the first training sequence of the day. After a standardized warm-up (5-min of dynamic stretching and joint mobilization exercises, 10-min of athletic skills and moderate-intensity running, followed by 10, 15, and 20-m accelerations each repeated twice), the athletes were given three trials, with 5 min recovery intervals in between, to perform the 30-m sprint as quickly as possible. The times were recorded using photoelectric cells (Brower Timing Systems, Draper, UT, USA) positioned at the start and at 30-m. The lowest time was considered for further analysis.

Repeated-Sprint Ability

After a standardized warm-up (same as the 30-m sprint test), the RSA was measured on artificial turf and in no-wind conditions at 10 am as follows: (i) two maximal 20-m sprints were performed with a full recovery (2 min between each), and the best time was assigned as a reference, (ii) 5-min of recovery were allowed before the beginning of the test, and (iii) 12×20 -m sprints every 20-s were performed at maximal intensity (Gabbett et al., 2011). The first two 12×20 -m sprints were controlled in real time to ensure that the participant performed the sprints close to his maximum intensity (for three athletes for whom the first two sprints did not reach a threshold of 95% of the reference time, the test was stopped and restarted after 5-min of passive recovery). During all sprints, the participants received strong verbal encouragement. The times were measured using photocells (Brower Timing Systems, Draper, UT, USA) positioned at the start and at 20-m. The RSA_{tot} (sum of the 12 sprint times) and the performance decrement score (RSA_{dec} , Equation 1) were calculated and considered as RSA indices.

$$RSA_{dec} = \left(\frac{S_1 + S_2 + S_3 \dots + S_{12}}{12 \times S_{best}} - 1 \right) \times 100 \quad (1)$$

Equation 1. Performance decrement score. RSA_{dec} is the percentage decrease in performance, S_n is the time of the n sprint and S_{best} is the time of the best sprint achieved (Girard et al., 2011).

30–15 Intermittent Fitness Test

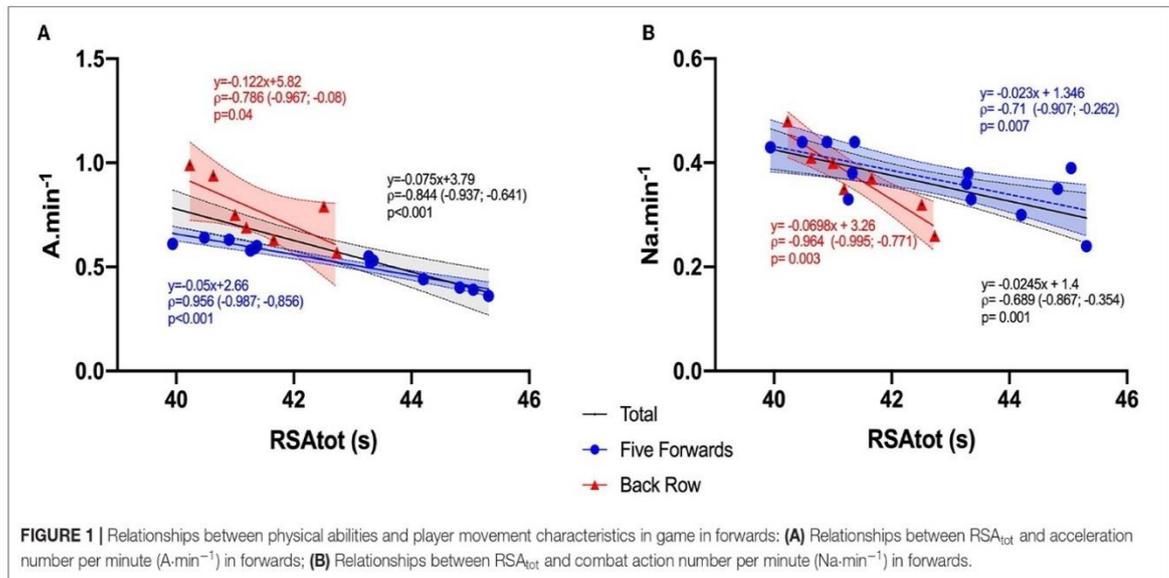
After a standardized warm-up (5-min of muscular work followed by 10-min of athletic drills and running at low and medium intensity), the 30–15 Intermittent Fitness Test (IFT) (Buchheit, 2008a) was performed during the first training sequence of the day around game 9, using natural turf. The 30–15 (IFT) is an incremental test consisting of 40-m shuttle bouts of 30-s at a given velocity, interspersed with 15-s of passive recovery. Each stage is followed by a velocity increment of $0.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, marked by an increase in the frequency of sound signals (audible signals allow participants to run 40-m shuttles at the given velocity). The test was stopped when the player could no longer maintain the required running speed. The 30–15 IFT end-running velocity (VIIFT) recorded corresponded to the velocity reached during the last step fully completed by the player.

In-Game GPS Data

The GPS system data were collected during 18 matches in the French semiprofessional third division (Federale 1). The time and position were recorded by a GPS unit (sampling rate, 10 Hz; Catapult Innovations, Melbourne, Australia), fixed between the scapulas. Accelerations were recorded with the GPS-integrated triaxial accelerometer (sampling rate: 400 Hz). Distance per minute ($D\cdot\text{min}^{-1}$, $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$), maximum velocity (V_{max} , $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$), sprint frequency ($S\cdot\text{min}^{-1}$: number of sprints $> 25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ per minute), distance traveled in high-velocity running zone per minute ($HSR\cdot\text{min}^{-1}$: sprint zone corresponds to velocity $> 25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) and the number of high accelerations per minute ($A\cdot\text{min}^{-1}$: number of accelerations $> 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) (Jones et al., 2015) were obtained from the software provided by the manufacturer (Catapult, playertek + V1.0.3). Only data from players who participated in at least 30 min on the field for each game were included.

Game Technical Statistics

During the match, individual player activities were recorded by video analysis (Sportscode, Jeddah, Saudi Arabia). The number of combat situations (tackle, duel, ruck, maul, and scrum) related to the player's playing time on the field was monitored for each participant and noted $\text{Na}\cdot\text{min}^{-1}$. The tackle count represents the number of tackles attempts (missed and succeeded). The duel count represents the number of running evasion events attempted with the ball in hand. The maul count represents the number of offensive and defensive maul participations. Ruck is the number of participations in offensive and defensive rucks. The technical efficiency of tackle (TackleEFF), and ruck (RuckEFF) were calculated as



the percentage of successful actions relative to total actions attempted by a player and were coded a single rater to avoid inter rater variation. Efficiency was based on objective criteria defined and used by two professional coaches to quantify the team's performance in season (**Supplemental Data 2**). This method has been proven to be more reliable in quantifying collisions than microtechnology analysis (Reardon et al., 2017). The intra observer variation was checked using an intra-class correlation coefficient for rucking efficiency (ICC = 0.97 [0.94; 0.99]; SEM = 0.025) and tackling efficiency (ICC = 0.98 [0.97; 0.96]; SEM = 0.023). The inter-subject coefficients of variation were 0.13 and 0.22 % for RuckEFF and TackleEFF, respectively. The mean intrasubject coefficients of variation were $0.11 \pm 0.08\%$ for Tackle EFF and $0.09 \pm 0.03\%$ for Ruck EFF.

Statistical Analysis

All data are expressed as means \pm SD. The Shapiro-Wilk test and Levene's test were applied to verify the normality and homoscedasticity of the variables. When these two parameters were verified, an ANOVA test was used to determine intergroup differences, followed by a Tukey *post hoc* test when appropriate. When one of the two parameters was not verified, we applied non-parametric tests: Kruskal-Wallis ANOVA and the Mann-Whitney U test were used to account for intergroup differences. Partial η^2 (0.01, 0.06 and 0.14 for small, medium and large effect, respectively) or Cohen's d (0.2, 0.5, and 0.8 for small, medium and large effect, respectively) effect sizes were calculated and expressed as an absolute value to determine the magnitude and practical relevance of changes. Spearman correlations were determined to identify relationships among the selected variables. All calculations were performed using Statistica 13.2 software (StatSoft, Inc., Tulsa, USA) with a threshold of significance set at $p \leq 0.05$.

RESULTS

In forwards (**Figure 1** and **Table 1**), while RSA_{dec} was not significantly related to player movement characteristics, RSA_{tot} was significantly correlated with V_{max} , $S \cdot \text{min}^{-1}$, $A \cdot \text{min}^{-1}$ and $HSR \cdot \text{min}^{-1}$ ($p = 0.02$, $p = 0.05$, $p < 0.01$ and $p = 0.047$, respectively). Additionally, VIFT was associated to movement characteristics across all variables (All $p < 0.05$). Thirty-meter sprint time was correlated with $A \cdot \text{min}^{-1}$ ($p = 0.009$). When players were divided into four groups, there was a strong negative correlation in FRL between RSA_{tot} and $A \cdot \text{min}^{-1}$ ($\rho = -0.96$, $p < 0.001$), and VIFT was significantly correlated with $HSR \cdot \text{min}^{-1}$ ($p = 0.008$) and $S \cdot \text{min}^{-1}$ ($p = 0.027$). The 30-m sprint time was inversely correlated with $A \cdot \text{min}^{-1}$ ($p = 0.002$). In the back row, a better performance in RSA_{tot} was associated with a higher $D \cdot \text{min}^{-1}$ ($\rho = -0.96$, $p = 0.002$) and $A \cdot \text{min}^{-1}$ ($p = 0.04$).

In backs (**Figure 2** and **Table 1**), RSA_{tot} was negatively correlated with $D \cdot \text{min}^{-1}$, V_{max} , $S \cdot \text{min}^{-1}$ and $HSR \cdot \text{min}^{-1}$ ($p = 0.001$, $p < 0.001$, $p = 0.007$, and $p = 0.004$, respectively), whereas no significant relationship was found between player movement characteristics and 30-m sprint time, VIFT or RSA_{dec} . When players were divided into four groups, while RSA_{dec} and VIFT were not significantly related to player movement data in inside backs, strong negative correlations were found ($\rho = -0.81$, $p = 0.05$; $\rho = -0.94$, $p = 0.033$, and $\rho = -0.94$, $p = 0.017$) between RSA_{tot} and $D \cdot \text{min}^{-1}$, $A \cdot \text{min}^{-1}$, and $HSR \cdot \text{min}^{-1}$, respectively. In outside backs, RSA_{tot} was negatively associated to $S \cdot \text{min}^{-1}$ ($\rho = -0.84$, $p = 0.012$) and V_{max} ($\rho = -0.89$, $p = 0.012$).

Relationships Between Physical Abilities and Technical Performance in Matches (Figure 1 and Table 2)

In forwards, lower time in RSA_{tot} was associated with higher $Na \cdot \text{min}^{-1}$ ($p = 0.001$). Moreover, there was a significant correlation between VIFT and TackleEFF ($p = 0.028$) and

TABLE 1 | Relationships between physical abilities and movement characteristics in matches according to position.

		30 m sprint time (s)	VIFT (km·h ⁻¹)	RSA _{tot} (s)	RSA _{dec} (%)
Forward	D·min ⁻¹ (m·min ⁻¹)	-0.26	0.62*	-0.36	0.07
	V _{max} (km·h ⁻¹)	-0.36	0.77*	-0.46*	-0.11
	S·min ⁻¹	-0.41	0.79*	-0.50*	-0.03
	A·min ⁻¹	-0.69*	0.81*	-0.85*	-0.14
	HSR·min ⁻¹	-0.36	0.73*	-0.48*	-0.07
Back	D·min ⁻¹ (m·min ⁻¹)	-0.15	0.36	-0.69*	0.01
	V _{max} (km·h ⁻¹)	-0.54	0.51	-0.84*	0.05
	S·min ⁻¹	-0.47	0.50	-0.71*	-0.07
	A·min ⁻¹	0.12	-0.10	-0.28	0.27
	HSR·min ⁻¹	-0.50	0.42	-0.76*	-0.01
Front row and locks	D·min ⁻¹ (m·min ⁻¹)	-0.04	0.30	0.01	0.30
	V _{max} (km·h ⁻¹)	-0.27	0.48	-0.31	0.27
	S·min ⁻¹	-0.40	0.56*	-0.41	0.25
	A·min ⁻¹	-0.80*	0.55	-0.96*	0.04
	HSR·min ⁻¹	-0.35	0.59*	-0.34	0.25
Back row	D·min ⁻¹ (m·min ⁻¹)	-0.75	0.40	-0.96*	0.32
	V _{max} (km·h ⁻¹)	0.18	0.09	-0.01	0.11
	S·min ⁻¹	0.07	0.15	-0.04	0.64
	A·min ⁻¹	-0.32	0.76*	-0.79*	0.18
	HSR·min ⁻¹	0.36	0.26	0.01	0.29
Inside backs	D·min ⁻¹ (m·min ⁻¹)	-0.77	0.26	-0.81*	-0.26
	V _{max} (km·h ⁻¹)	-0.83*	0.41	-0.77	-0.20
	S·min ⁻¹	0.09	0.47	-0.66	-0.09
	A·min ⁻¹	-0.09	0.15	-0.94*	-0.08
	HSR·min ⁻¹	-0.09	0.15	-0.94*	-0.09
Outside backs	D·min ⁻¹ (m·min ⁻¹)	-0.54	0.51	-0.29	0.11
	V _{max} (km·h ⁻¹)	0.10	0.34	-0.89*	0.07
	S·min ⁻¹	-0.25	0.58	-0.85*	-0.21
	A·min ⁻¹	0.14	-0.50	-0.67	0.29
	HSR·min ⁻¹	-0.43	0.58	-0.60	0.01

Values represent Spearman's ρ. VIFT, 30-15 IFT end-running velocity; RSA_{tot}, total time for repeated-sprint ability; RSA_{dec}, performance decrement percentage; D·min⁻¹, distance per min (m·min⁻¹); V_{max}, maximum velocity reached in game (km·h⁻¹); S·min⁻¹, number of sprints per minute; A·min⁻¹, number of accelerations per minute; HSR·min⁻¹, high-velocity running per minute.

*p < 0.05.

Bold values means significant correlations (p < 0.05).

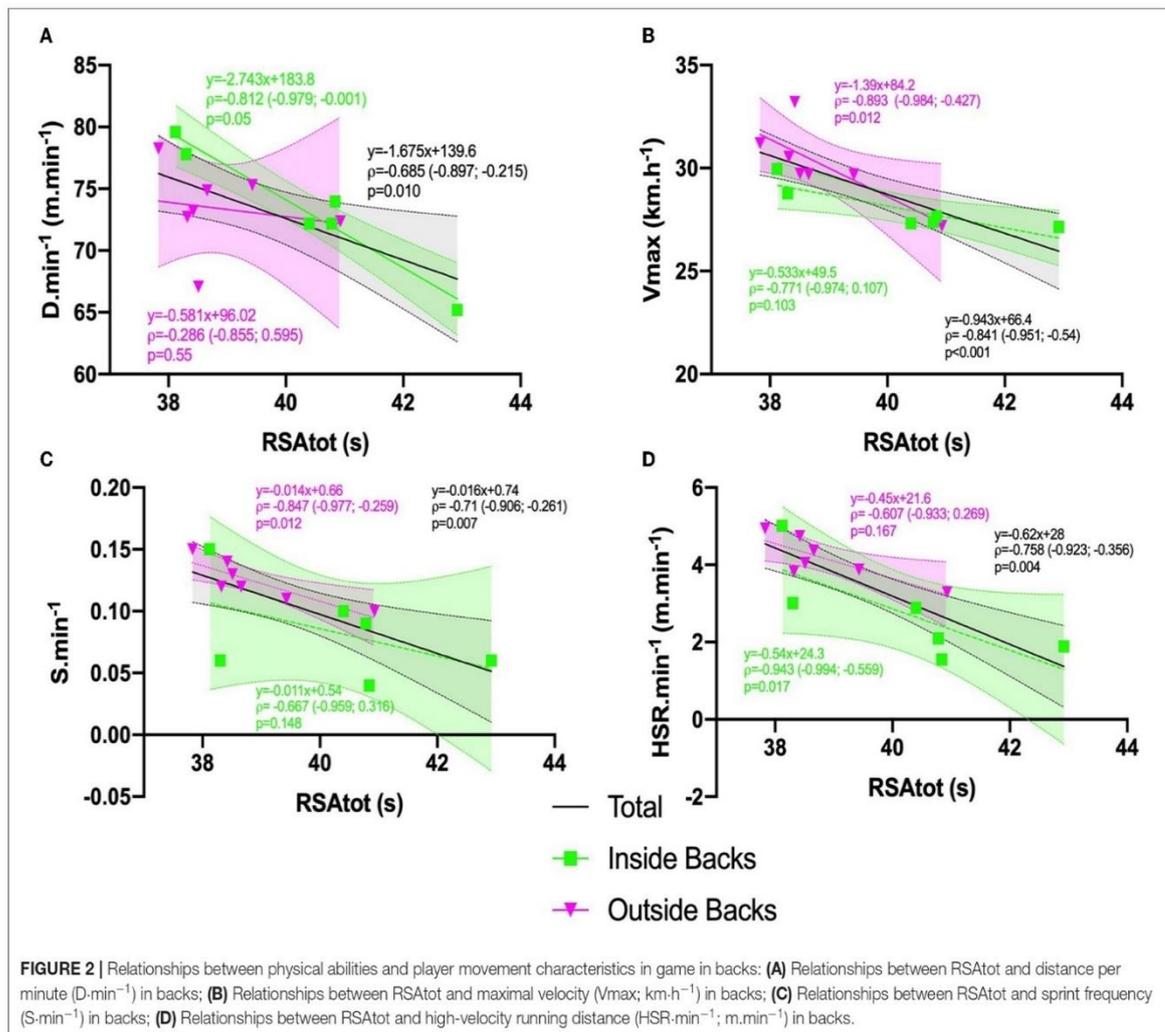
between 30-m sprint time and Na·min⁻¹ (p = 0.007). When players were divided into positional subgroups, RSA_{tot} and 30-m sprint time were negatively associated with Na·min⁻¹ (both p = 0.007), and VIFT was positively correlated with TackleEFF (p = 0.05) in FRL. In the back row, a strong association was found between RSA_{tot} and Na·min⁻¹ (ρ = -0.96, p = 0.002), and VIFT was correlated with RuckEFF (p = 0.047).

For backs, inside backs and outside backs, no significant relationships were observed between physical abilities and technical performance. Differences in physical ability and activity data in the matches according to position are shown in **Supplemental Datas 3, 4**, respectively.

DISCUSSION

The aim of this study was to investigate the relationships between RSA and several match performance parameters according to position in rugby union. The main results of this study show significant correlations between RSA and players' movement activity and game-based performance variables in rugby union match. The main finding is that for each playing position, RSA performance was significantly associated with specific KPI in matches, including specific moving and fighting situations.

Previous studies have investigated the relationship between RSA and movement characteristics and technical data on the entire team (Gabbett et al., 2013) and on the differences between forwards and backs (Smart et al., 2014). The purpose of this study



was to go beyond these classifications as there are highly specific tasks, duty cycle, etc. in each of these group depending on the position (Austin et al., 2011a, 2013; Cahill et al., 2013); thus, this study is the first to analyze movement characteristics and technical data in the same research, with a refined analysis based on 4 position subgroups.

The better the performance in RSA_{tot} was, the more accelerations and combat situations the forwards performed. It has been reported that the number of tackles and the number of offensive tackles had a positive impact on match performance, particularly for forwards, and that forwards have a higher activity index (number of actions per minute of ball in play) when matches are won, while movement activity (GPS data) was described as a positive performance indicator for backs (Dubois et al., 2020). Previous research showed that RSA was associated with the number of total collisions (which was associated to maximal aerobic power) and high-velocity distance in players with a higher fitness level in the rugby league. VIFT has previously been associated with maximum aerobic speed and maximal oxygen consumption (Buchheit, 2008b; Buchheit et al.,

2009). The significant correlations observed between VIFT and player movements are consistent as higher maximal aerobic power will allow players to have produced a greater work on a match scale.

Furthermore, researchers demonstrated that mean sprint time was related to activity rate, successful tackles and successful jackals (stealing the ball from the tackle) in forwards (Smart et al., 2014). In addition, the winning teams in rugby league had players who performed significantly more RHIE than losing teams (Gabbett, 2013). The importance for all players to repeat high-intensity efforts may be similar in rugby union. This capacity to reproduce high-intensity efforts could diminish at the end of the game independently of the position (Beard et al., 2019; Fornasier-Santos et al., 2021) and could depend on the player's status, especially for forward starters who tend to lose performance during the game (Tee et al., 2020). In addition, it has been shown that RSA performance is an important physical ability for selection in the rugby league (Le Rossignol et al., 2014). Our results thus confirm that RSA could be a key physical ability for forward players to perform during matches.

TABLE 2 | Relationships between physical abilities and technical performance in matches according to position.

		30 m sprint time (s)	VIFT (km·h ⁻¹)	RSA _{tot} (s)	RSA _{dec} (%)
Forward	Na·min ⁻¹	-0.62*	0.24	-0.69*	-0.02
	RuckEFF	-0.01	0.18	-0.06	-0.13
	TackleEFF	-0.05	0.50*	-0.17	-0.28
Back	Na·min ⁻¹	0.10	-0.17	0.01	0.02
	RuckEFF	0.10	0.02	0.49	-0.09
	TackleEFF	0.43	-0.01	-0.25	-0.21
Front row and locks	Na·min ⁻¹	-0.70*	0.45	-0.65*	0.01
	RuckEFF	0.01	0.18	-0.10	-0.06
	TackleEFF	0.03	0.64*	-0.18	-0.30
Back row	Na·min ⁻¹	-0.57	0.42	-0.96*	0.14
	RuckEFF	0.03	0.76*	-0.14	-0.04
	TackleEFF	-0.34	-0.20	-0.20	0.36
Inside backs	Na·min ⁻¹	-0.37	-0.38	-0.60	0.31
	RuckEFF	0.60	0.38	0.26	0.09
	TackleEFF	0.49	-0.26	0.60	-0.49
Outside backs	Na·min ⁻¹	-0.46	0.24	-0.71	-0.50
	RuckEFF	-0.11	0.09	-0.46	-0.21
	TackleEFF	-0.14	0.37	-0.40	0.07

Values represent Spearman's ρ . VIFT, 30-15 IFT end-running velocity; RSA_{tot}, total time for repeated-sprint ability; RSA_{dec}, performance decrement percentage; Na·min⁻¹, number of combat actions per minute; RuckEFF, ruck efficiency ratio; TackleEFF, tackle efficiency ratio.

* $p < 0.05$.

Bold values means significant correlations ($p < 0.05$).

However, when analyzing FRL and Back row separately, relationships between RSA and movement characteristics appear to differ slightly. It has been shown in previous studies that FRL players completed more RHIE (11-18 RHIE per game) than full backs (Austin et al., 2011b) and the highest number of accelerations (Donkin et al., 2020), RSA_{tot} was significantly and inversely correlated with Na·min⁻¹ and A·min⁻¹. In this regard, the latter study (Cunningham et al., 2016) suggests that RSA performance is an important indicator of the ability to reproduce the high-intensity efforts that props, hookers and second row players are confronted with. Likewise, VIFT also was related to S·min⁻¹ and HSR·min⁻¹, reflecting the indispensable nature of O₂ consumption for improving the velocity of phosphocreatine resynthesis between high-intensity efforts (Buchheit, 2012).

In back row players, RSA_{tot} was inversely correlated with D·min⁻¹, A·min⁻¹, and Na·min⁻¹, while VIFT was related to ruckEFF. Back rows have a mixed activity pattern with high distance running, but also are largely solicited on combat situations (Cahill et al., 2013), as they perform the most RHIE (Jones et al., 2015). These results suggest that RSA also is a determining physical ability for the mixed performance of the back row, since it may play an important role on improving both their ability to produce high-mean velocity running and their number of participations in combat actions during matches.

In Backs, RSA_{tot} was correlated to all movement characteristics (except accelerations). The same correlations were not similarly observed when analyzing inside backs and outside backs separately. For inside backs, RSA was associated to total and high-velocity running distance, and number of

accelerations, while strong associations were found between RSA_{tot} and V_{max} and the number of sprints in outside backs. No relationships were found between RSA and the number or efficiency of combat tasks in both subgroups. Previously authors (Austin et al., 2011b), reported that inside backs have a high level of activity since they perform $\sim 16 \pm 2$ RHIE per game and cover the longest total distance (Cahill et al., 2013). Conversely, outside backs produce the highest velocity peaks (31.7 km·h) and spend twice as much distance in sprint intensity as the centers (Austin et al., 2013). Outside backs are less confronted with the repetition of high-intensity efforts, with 7 ± 3 RHIE by game (Austin et al., 2011b) due to the characteristic activity profile based on a work-recovery ratio geared toward recovery, which makes full backs less exposed to the repetition of intense efforts (Doutreloux et al., 2002). Nevertheless, a better RSA may help outside backs to increase the number of sprints and high-velocity activity.

In this study, RSA_{dec} was not associated with any of the measured game data. RSA_{dec} has previously been shown to correlate with aerobic fitness (Da Silva et al., 2010), or not (Bishop and Edge, 2006). One may hypothesize that the lack of correlation between RSA_{dec} and movement characteristics could be explained by the level of aerobic fitness of the athletes; indeed, Rodriguez-Fernandez et al. showed that RSA_{dec} correlated with aerobic abilities in soccer players with the lowest aerobic fitness, but not in those with high aerobic fitness (Rodriguez-Fernandez et al., 2019). In this study, VIFT was not correlated with RSA_{dec} in backs ($r = 0.39$, $p = 0.17$) as well as in forwards ($r = -0.23$, $p = 0.32$). Thus, RSA_{dec} might not be a robust and/or discriminant performance indicator in high level rugby union players.

The main limitations of this study are related to the small sample size. Indeed, the injuries and inclusion criteria did not allow obtaining large groups. This limitation would be problematic if no results were significant, but even with small numbers, very significant relationships with large Rs were observed. Nevertheless, one cannot exclude the possibility that some other significant correlations may have occurred with larger subgroups sample sizes, and that false-positive relationships may have occurred. On the other hand, only one RSA measure was performed over the period, which raises the question of individual variability during the season. However, familiarization with the RSA test was performed prior to the start of the study, and no significant difference between the RSA test included in this study and the familiarization test was observed (data not shown). In addition, the variability among matches might be considered a limitation that could have limited associations with fitness variables.

PRACTICAL APPLICATIONS

The findings of our research demonstrate the importance of RSA (which attests to the ability to reproduce high-intensity efforts) to match running and combat activity performance for each player's position on the pitch. A higher level of RSA is associated with improved match performance on position-specific KPI. Our results thus highlight the importance of assessing and developing RSA and, more generally, the ability to reproduce high-intensity efforts as a major performance factor for in-game specific KPI. However, these results must be confirmed by further studies, as they were obtained from analysis based on a single team and thus may have been influenced by the team's tactical and strategic characteristics (Ungureanu et al., 2021).

CONCLUSION

These results demonstrate that RSA is associated with match running and combat activity performance (i) in a global way

and (ii) specifically for each player's position. RSA seems to be a predominant physical quality for the performance of all positions in rugby union as it is associated with KPI, despite the great differences in activity among positions.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

ETHICS STATEMENT

The studies involving human participants were reviewed and approved by Local Ethics Committee, University of Lyon. The patients/participants provided their written informed consent to participate in this study.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

PG and CM contributed to conception and design of the study. PG, IR, and CM organized the database and performed the statistical analysis. PG wrote the first draft of the manuscript. IR, BM, and BC wrote sections of the manuscript. All authors contributed to manuscript revision, read, and approved the submitted version.

FUNDING

This study was realized within the framework of a CIFRE agreement thesis and was supported by the National Association for Research and Technology.

SUPPLEMENTARY MATERIAL

The Supplementary Material for this article can be found online at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspor.2022.857373/full#supplementary-material>

REFERENCES

- Austin, D., Gabbett, T., and Jenkins, D. (2011a). The physical demands of Super 14 rugby union. *J. Sci. Med. Sport* 14, 259–263. doi: 10.1016/j.jsams.2011.01.003
- Austin, D., Gabbett, T., and Jenkins, D. (2011b). Repeated high-intensity exercise in professional rugby union. *J. Sports Sci.* 29, 1105–1112. doi: 10.1080/02640414.2011.582508
- Austin, D. J., Gabbett, T. J., and Jenkins, D. G. (2013). Reliability and sensitivity of a repeated high-intensity exercise performance test for rugby league and rugby union. *J. Strength Cond. Res.* 27, 1128–1135. doi: 10.1519/JSC.0b013e31825fe941
- Beard, A., Ashby, J., Chambers, R., Millet, G. P., and Brocherie, F. (2019). Wales anaerobic test: reliability and fitness profiles of international rugby union players. *J. Strength Cond. Res.* doi: 10.1519/JSC.00000000000003448
- Bishop, D., and Edge, J. (2006). Determinants of repeated-sprint ability in females matched for single-sprint performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 97, 373–379. doi: 10.1007/s00421-006-0182-0
- Bishop, D., Girard, O., and Mendez-Villanueva, A. (2011). Repeated-sprint ability - part II: recommendations for training. *Sports Med.* 41, 741–756. doi: 10.2165/11590560-000000000-00000
- Buchheit, M. (2008a). 30-15 Intermittent Fitness Test et répétition de sprints. *Sci. Sports* 23, 26–28. doi: 10.1016/j.scispo.2007.12.002
- Buchheit, M. (2008b). The 30-15 intermittent fitness test: accuracy for individualizing interval training of young intermittent sport players. *J. Strength Cond. Res.* 22, 365–374. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181635b2e
- Buchheit, M. (2012). Repeated-sprint performance in team sport players: associations with measures of aerobic fitness, metabolic control and locomotor function. *Int. J. Sports Med.* 33, 230–239. doi: 10.1055/s-0031-1291364
- Buchheit, M., Laursen, P. B., Kuhnle, J., Ruch, D., Renaud, C., and Ahmaidi, S. (2009). Game-based training in young elite handball players. *Int. J. Sports Med.* 30, 251–258. doi: 10.1055/s-0028-1105943
- Cahill, N., Lamb, K., Worsfold, P., Headey, R., and Murray, S. (2013). The movement characteristics of English Premiership rugby union players. *J. Sports Sci.* 31, 229–237. doi: 10.1080/02640414.2012.727456

- Coughlan, G. F., Green, B. S., Pook, P. T., Toolan, E., and O'Connor, S. P. (2011). Physical game demands in elite rugby union: a global positioning system analysis and possible implications for rehabilitation. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 41, 600–605. doi: 10.2519/jospt.2011.3508
- Cunniffe, B., Proctor, W., Baker, J. S., and Davies, B. (2009). An evaluation of the physiological demands of elite rugby union using Global Positioning System tracking software. *J. Strength Cond. Res.* 23, 1195–1203. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181a3928b
- Cunningham, D., Shearer, D. A., Drawer, S., Eager, R., Taylor, N., Cook, C., et al. (2016). Movement demands of elite U20 international rugby union players. *PLoS ONE* 11:e0153275. doi: 10.1371/journal.pone.0153275
- Da Silva, J. F., Guglielmo, L. G., and Bishop, D. (2010). Relationship between different measures of aerobic fitness and repeated-sprint ability in elite soccer players. *J. Strength Cond. Res.* 24, 2115–2121. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181e34794
- Deutsch, M. U., Kearney, G. A., and Rehrer, N. J. (2007). Time - motion analysis of professional rugby union players during match-play. *J. Sports Sci.* 25, 461–472. doi: 10.1080/02640410600631298
- Donkin, C., Venter, R., Coetzee, D., and Kraak, W. (2020). Positional in-match running demands of university rugby players in South Africa. *Front. Psychol.* 11:1591. doi: 10.3389/fpsyg.2020.01591
- Doutreloux, J. P., Tepe, P., Demont, M., Passelergue, P., and Artigot, A. (2002). Exigences énergétiques estimées selon les postes de jeu en rugby. *Sci. Sports* 17, 189–197. doi: 10.1016/S0765-1597(02)00133-8
- Dubois, R., Bru, N., Paillard, T., Le Cunuder, A., Lyons, M., Maurelli, O., et al. (2020). Rugby game performances and weekly workload: using of data mining process to enter in the complexity. *PLoS ONE* 15:e0228107. doi: 10.1371/journal.pone.0228107
- Fornasier-Santos, C., Millet, G. P., Stridgeon, P., Brocherie, F., Girard, O., and Nottin, S. (2021). How does playing position affect fatigue-induced changes in high-intensity locomotor and micro-movements patterns during professional rugby union games? *Eur. J. Sport Sci.* 21, 1364–1374. doi: 10.1080/17461391.2020.1829715
- Gabbett, T. J. (2013). Influence of the opposing team on the physical demands of elite rugby league match play. *J. Strength Cond. Res.* 27, 1629–1635. doi: 10.1519/JSC.0b013e318274f30e
- Gabbett, T. J., Jenkins, D. G., and Abernethy, B. (2011). Relative importance of physiological, anthropometric, and skill qualities to team selection in professional rugby league. *J. Sports Sci.* 29, 1453–1461. doi: 10.1080/02640414.2011.603348
- Gabbett, T. J., Jenkins, D. G., and Abernethy, B. (2012). Physical demands of professional rugby league training and competition using microtechnology. *J. Sci. Med. Sport* 15, 80–86. doi: 10.1016/j.jsams.2011.07.004
- Gabbett, T. J., Stein, J. G., Kemp, J. G., and Lorenzen, C. (2013). Relationship between tests of physical qualities and physical match performance in elite rugby league players. *J. Strength Cond. Res.* 27, 1539–1545. doi: 10.1519/JSC.0b013e318274f236
- Girard, O., Mendez-Villanueva, A., and Bishop, D. (2011). Repeated-sprint ability - part I: factors contributing to fatigue. *Sports Med.* 41, 673–694. doi: 10.2165/11590550-000000000-00000
- Jones, M. R., West, D. J., Crewther, B. T., Cook, C. J., and Kilduff, L. P. (2015). Quantifying positional and temporal movement patterns in professional rugby union using global positioning system. *Eur. J. Sport Sci.* 15, 488–496. doi: 10.1080/17461391.2015.1010106
- Le Rossignol, P., Gabbett, T. J., Comerford, D., and Stanton, W. R. (2014). Repeated-sprint ability and team selection in Australian football league players. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 9, 161–165. doi: 10.1123/ijspp.2013-0005
- Morel, B., Rouffet, D. M., Bishop, D. J., Rota, S. J., and Hautier, C. A. (2015). Fatigue induced by repeated maximal efforts is specific to the rugby task performed. *Int. J. Sports Sci. Coaching* 10, 11–20. doi: 10.1260/1747-9541.10.1.11
- Pollard, B. T., Turner, A. N., Eager, R., Cunningham, D. J., Cook, C. J., Hogben, P., et al. (2018). The ball in play demands of international rugby union. *J. Sci. Med. Sport* 21, 1090–1094. doi: 10.1016/j.jsams.2018.02.015
- Reardon, C., Tobin, D. P., Tierney, P., and Delahunty, E. (2017). The worst case scenario: locomotor and collision demands of the longest periods of gameplay in professional rugby union. *PLoS ONE* 12:e0177072. doi: 10.1371/journal.pone.0177072
- Roberts, S. P., Trewartha, G., Higgitt, R. J., El-Abd, J., and Stokes, K. A. (2008). The physical demands of elite English rugby union. *J. Sports Sci.* 26, 825–833. doi: 10.1080/02640410801942122
- Rodriguez-Fernandez, A., Sanchez-Sanchez, J., Ramirez-Campillo, R., Nakamura, F. Y., Rodriguez-Marroyo, J. A., and Villa-Vicente, J. G. (2019). Relationship between repeated sprint ability, aerobic capacity, intermittent endurance, and heart rate recovery in youth soccer players. *J. Strength Cond. Res.* 33, 3406–3413. doi: 10.1519/JSC.0000000000002193
- Smart, D., Hopkins, W. G., Quarrie, K. L., and Gill, N. (2014). The relationship between physical fitness and game behaviours in rugby union players. *Eur. J. Sport Sci.* 14, S8–S17. doi: 10.1080/17461391.2011.635812
- Sparks, M., and Coetzee, B. (2013). The use of heart rates and graded maximal test values to determine rugby union game intensities. *J. Strength Cond. Res.* 27, 507–513. doi: 10.1519/JSC.0b013e31825420bd
- Suárez-Arrones, L. J., Portillo, L. J., González-Ravé, J. M., Muñoz, V. E., and Sanchez, F. (2012). Match running performance in Spanish elite male rugby union using global positioning system. *Isokinet. Exerc. Sci.* 20, 77–83. doi: 10.3233/IES-2012-0444
- Takamori, S., Hamlin, M. J., Kieser, D. C., King, D., Hume, P., Yamazaki, T., et al. (2020). Senior club-level rugby union player's positional movement performance using individualized velocity thresholds and accelerometer-derived impacts in matches. *J. Strength Cond. Res.* 36, 710–716. doi: 10.1519/JSC.0000000000003523
- Tee, J. C., Coopoo, Y., and Lambert, M. (2020). Pacing characteristics of whole and part-game players in professional rugby union. *Eur. J. Sport Sci.* 20, 722–733. doi: 10.1080/17461391.2019.1660410
- Ungureanu, A. N., Brustio, P. R., and Lupo, C. (2021). Technical and tactical effectiveness is related to time-motion performance in elite rugby. *J. Sports Med. Phys. Fit.* 61, 167–174. doi: 10.23736/S0022-4707.20.10998-8
- Zabaloy, S., Alcaraz, P. E., Pereira, L. A., Giráldez, J., González, J. G., Loturco, I., et al. (2021). Anthropometric traits and physical performance of amateur rugby players within specific playing positions. *Isokinet. Exerc. Sci.* 29, 429–441. doi: 10.3233/IES-210137

Conflict of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher's Note: All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

Copyright © 2022 Glaise, Morel, Rogowski, Cornu and Martin. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Discussion et perspectives

Cette étude confirme les différences significatives de profil d'activité entre les différents groupes, en accord avec un grand nombre d'études dans la littérature scientifique. Les principaux résultats montrent que, chez les avants, plus la capacité à répéter des sprints est importante (i.e. plus le temps de sprint cumulé est faible dans le test RSa) plus le nombre d'accélération et d'efforts de contact au cours des matchs est élevé. Chez les arrières, la RSa est corrélée avec les paramètres de la course à haute intensité, tels que la distance, la Vmax, la fréquence des sprints et la distance à haute vitesse. On retrouve ces spécificités en divisant l'effectif en quatre sous-groupes. Ainsi, chez le cinq de devant, la RSa est associée au nombre d'accélération et aux efforts de contact alors que chez les troisièmes lignes, la RSa est corrélée à la distance et à la fréquence des efforts de contact. Chez les arrières intérieurs, la RSa est significativement corrélée à la distance totale parcourue, au nombre d'accélération, et à la distance parcourue à haute vitesse. Chez les arrières extérieurs la RSa est corrélée à la fréquence des sprints ainsi qu'à la vitesse maximale atteinte en match. Ces résultats démontrent que la RSa est associée à la performance en match sur l'ensemble des efforts (i) quel que soit le poste sur le terrain et (ii) de façon spécifique au profil d'activité de chaque poste. **Un niveau plus élevé de RSa semble être associé à une meilleure performance en match concernant les indicateurs clés de performance spécifiques au poste.** Nos résultats soulignent donc l'importance d'évaluer et de développer la RSa et, plus généralement, la capacité à reproduire des efforts de haute intensité en tant que facteur de performance majeur pour les indicateurs de performance clés spécifiques au match. Cependant, ces résultats doivent être confirmés par d'autres études car ils ont été obtenus à partir d'une analyse basée sur une seule équipe et peuvent donc avoir été influencés par les caractéristiques tactiques et stratégiques de l'équipe. Par conséquent, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour obtenir une analyse plus approfondie afin d'établir des conclusions solides.

Étude 3. Altération de la performance au cours d'une répétition d'effort de haute intensité dans des conditions variées de force et de vitesse chez des joueurs de rugby professionnels

Problématique

Le rugby à XV est un sport intermittent qui requiert des efforts de haute intensité de course et des contacts. La capacité à répéter ces efforts de haute intensité est considérée comme un déterminant majeur de la performance dans les matchs de rugby, en particulier la capacité à réaliser des séquences de répétition d'efforts de haute intensité (c'est-à-dire les séquences RHIE). Bien que la capacité à répéter ces séquences (RHIEa) soit essentielle à la performance, la plupart des études se sont concentrées sur les fondements physiologiques de cette capacité physique ainsi que sur l'occurrence des séquences RHIE et leur impact sur la performance en match (Austin et al., 2011, Gabbett et al., 2013b, Johnston et al., 2015, Johnston et al., 2011, Sheehan et al., 2022). La compréhension des changements biomécaniques résultant de la fatigue physiologique survenant pendant une séquence RHIE reste limitée. Par conséquent, les objectifs de cette recherche étaient doubles : premièrement, évaluer la performance des avants et des arrières au cours d'une séquence RHIE, en incorporant diverses conditions de force et de vitesse (efforts isométriques, résistés et de sprint) ; et deuxièmement, déterminer les altérations des capacités de production et d'application de force horizontale à travers l'évaluation du profil FV en sprint.

Méthodes

Pour répondre à cette problématique, vingt-sept joueurs professionnels de rugby masculin ont participé à l'étude. Tout d'abord, un profil FV de référence a été évalué en effectuant deux sprints de 30 mètres avec cinq minutes de récupération passive entre chaque sprint. Les paramètres évalués comprenaient V_0 (vitesse théorique maximale), P_{max} (puissance maximale/kg), F_0 (force théorique maximale/kg), S_{fv} (pente force-vitesse), RF_{max} (taux maximal de force) et DR_f (ratio de diminution de la force). Ensuite, les participants ont réalisé une séquence RHIE comprenant trois efforts de haute intensité différents, répétés trois fois chacun (neuf efforts au total),

avec vingt secondes de récupération entre chaque effort. Ces efforts comprenaient (i), une poussée isométrique horizontale réalisée en condition de vitesse nulle et en condition de force maximale ; (ii), une poussée de sled de 10 mètres (chargé à 60% du poids du corps) performée en moyenne à $3,25 \pm 0,27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ce qui représentait environ 39% de la V_0 moyenne et présentait des conditions mixtes de force et de vitesse; et (iii) un sprint de 30 mètres réalisé en moyenne à $7,78 \pm 0,65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ce qui représentait 91% de la V_0 moyenne et était considéré comme un effort de condition de vitesse maximale pour une condition de force faible. Des mesures de performance ont été réalisées pendant la séquence RHIE, et les profils FV ont été calculés pour chaque sprint. De plus, des mesures de la charge interne telles que l'échelle de perception de l'effort (RPE) et la concentration de lactate dans le sang ([La]) ont été enregistrées.

Title: Alteration in performance of varied force and velocity conditions tasks composing a repeated high-intensity effort bout in elite rugby union players

Glaise P, Morin J-B., Morel B., Martin C.

ABSTRACT

Purpose: The ability to repeat high-intensity efforts is considered as a major determinant of performance in rugby games. Knowledge on the evolution of the efforts throughout a repeated high-intensity efforts (RHIE) bout that may result from physiological fatigue is very limited. The aim of this study was to determine whether and how the performance of high-intensity efforts of different force and velocity conditions evolves during a RHIE bout, with a focus on identifying alterations in sprint force-velocity (FV) profile during this RHIE bout.

Methods : Twelve forward and thirteen back professional male rugby players performed a 30-m sprints in non-fatigue conditions, and a RHIE bout composed of three different high-intensity efforts (horizontal isometric push, 10-m sled push weighted at 60% of athlete's body mass and 30-m sprint) performed three times each (nine efforts in total) with twenty seconds of recovery between each. The performance of each effort was measured during the RHIE bout and at each sprint a FV profile was computed.

Results: During the RHIE bout, significant *time* effects were observed concerning sled push velocity, isometric thrust and sprint velocity ($p < 0.001$ for all). Sled push and sprint velocities showed significant declines from RHIE T1 to RHIE T2 ($d = 0.44$, $p < 0.033$ and $d = 0.83$, $p < 0.001$, respectively) and from RHIE T2 to RHIE T3 ($d = 0.53$, $p < 0.022$ and $d = 0.76$, $p < 0.001$, respectively) while isometric thrust only significantly decreased between RHIE T1 and RHIE T3 ($d = 0.86$, $p < 0.001$). In sprint FV profile, significant *time* effects were obtained during the RHIE bout concerning V_0 ($p = 0.029$), P_{max} ($p < 0.001$) and rP_{max} ($p < 0.001$). V_0 was significantly lower during RHIE T2 compared to Baseline FV profile ($d = 0.56$, $p = 0.042$). P_{max} and rP_{max} significantly decreased between Baseline and RHIE T2 ($d = 0.82$ and $d = 0.79$, $p < 0.001$ respectively), and between Baseline and RHIE T3 ($d = 0.64$ and $d = 0.63$, $p = 0.013$).

Conclusion: Our results show that, during a RHIE bout, performance of each type of efforts significantly decreases over time regardless of the playing position. Moreover, on average, only the mechanical properties associated with the velocity of the FV spectrum were altered, with a decrease in V_0 and

rPmax during RHIE bout showing a reduction in the athletes' ability to apply horizontal force at high velocities. Similar results had been obtained during repeated sprint exercise and could be associated with significant metabolic fatigue.

Keywords: Rugby Union, Repeated High-Intensity Efforts, Mechanical Properties, Force-Velocity Profile, Performance, Fatigue.

INTRODUCTION

Rugby Union is a sport characterized by repeated high-intensity efforts separated by recovery periods of random duration and intensity (7). High-intensity efforts can be of a running or contact nature and are performed under all force and velocity conditions, ranging from maximum isometric effort to maximum velocity sprint (5, 30, 35). Contact efforts, including scrums, mauls, tackles, and rucks, are considered to be static and low-velocity activities (30). Those actions are very frequent (178 ± 27 rucks; 270 ± 25 tackles / game (28)) but also key phases in performance (5, 8). Running efforts, including accelerations (between 4.0 and 13.9 accelerations $> 3\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ per game), and moderate to maximal velocity sprints (between 6.1 and 33.9 per game) can also be decisive in this sport (6). Due to their very different activity profiles, some playing positions are more concerned with contact efforts (*e.g.* forwards) whereas others are more concerned with running efforts (*e.g.* backs) (4, 21, 34). Whatever the prevalence of certain types of activity according to the position, all players are required to produce and repeat any high intensity effort during the match.

A repeated high-intensity effort (RHIE) bout has been defined as a sequence of three or more intense efforts interspersed with less than 21 s of recovery between each (2, 3). Intense efforts include accelerations ($\geq 2.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$), high-speed running and sprints ($> 5.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), or contact efforts (such as tackles, rucks or mauls) (1, 12). The ability to repeat high-intensity efforts is considered as a major determinant of performance in rugby games (15). For instance, in rugby league, winning teams perform more RHIE bouts, composed of a greater average and maximum number of efforts per bout than losing teams (10). Furthermore, top 4 teams in rugby league perform more RHIE bouts before conceding tries compared to bottom 4 teams (3.0 ± 2.1 vs 1.6 ± 0.7 respectively)(11). As preliminary contact efforts may influence further running efforts intensities (18, 20), it seems interesting to further explore the effect of one type of task on another during RHIE.

Although RHIE ability (RHIEa) is critical to performance, most studies have focused on either the physiological determinants of this physical ability (13, 17, 18, 36) or the occurrence and influence of RHIE bouts and during match performance (2, 13, 17, 18, 32). However, the nature of the effort during a RHIE can influence the appearance of neuromuscular fatigue and of performance decrease, both in terms of amplitude and the mechanisms involved. For instance, during a series of five high-intensity efforts interspersed with twenty seconds of recovery, differences in performance decrements have been observed depending on the nature of the efforts being scrum ($23.3 \pm 5.3\%$), maul ($12.6 \pm 2.5\%$) or sprints ($7.3 \pm 0.9\%$) (24). Moreover, each task was associated with different neuromuscular and metabolic response as the electromyographic activity decreases only after scrums and mauls whereas blood lactate concentration is higher after mauls and sprints compared to scrums. This is in line with other studies which have shown that fatigue is mainly central during the repetition of scrums (22), whereas the repetition of sprints seems to generate more peripheral muscular perturbations (ref). However, these studies only focused on RHIE bouts consisting of same efforts repetition, while RHIE bouts in ecological conditions (i.e. during games) are mainly consisting of the succession of different tasks whose nature and sequence depends on the players' position (2, 32).

Fatigue assessment during a repetition of intensive efforts is frequently quantified by the decrease of a specific metric variable such as time, velocity, or force produced over the task (9, 37). However, depending on the variable observed, different results concerning performance dynamics can be found (15). In this context, the utilization of force-velocity properties provides an interesting perspective in assessing physical fatigue. This methodology enables a detailed exploration of alterations in force, power, and velocity production capacities, each of which is underpinned by distinct physiological processes.

These properties can be analyzed through the sprint force-velocity relationship which evaluates the athlete's ability to produce propulsive horizontal force during sprinting over the entire spectrum of velocities conditions (31). The sprint force-velocity (FV) relationship consists of several mechanical

parameters, including theoretical maximum force (F_0), theoretical maximum velocity (V_0), maximum propulsive power (P_{max}) produced during the sprint, maximum ratio between horizontal force and resultant force over one step (RF_{max}), and rate of decrease of this ratio of forces with increasing velocity (DRF)(26, 31). The latter two variables are considered as important performance factors in sprinting as they reflect the athlete's ability to apply force effectively in the antero-posterior direction at low velocities and to maintain it during the acceleration phase as velocity increases (25, 29). They also have been shown to be significantly associated with skills efficiency during rugby union games (14). Sprint FV relationship is known to change throughout a repeated sprint ability (RSA) test (ten sets of 40 m sprints with a start each 30 s cycle) in rugby sevens players (16). The fatigue observed in this RSA test results in 15% V_0 decrease and 14% DRF increase, likely due to an alteration in the ability to maintain a horizontally oriented force application as velocity increases rather than during the initial acceleration phase. However, as preliminary contact efforts may influence subsequent running efforts intensities (18, 20), whether the FV profile of sprinting during a RHIE bout is still unknown.

The aim of this study was i) to evaluate forward and backs performance during a RHIE bout which aimed to simulate game conditions by mixing the force and velocity conditions of the efforts (isometric, resisted and sprint effort) and ii) to distinguish the reduction in force and velocity capacities using running force-velocity evaluation. The hypothesis is that the proposed RHIE will lead to a greater reduction in horizontal force production capacity.

METHODS

Participants

Twenty-five professional male rugby players from second's French national division (Pro D2) (age, 27.8 ± 2.6 years; height, 184.7 ± 7.7 cm; body mass, 99.7 ± 15.3 kg; four skinfolds body fat, $16.1 \pm 2.7\%$) were included in this study and divided into two groups: 12 forwards (age, 28.8 ± 2.7 years; height, 189.0 ± 9.0 cm; body mass, 112.8 ± 10.1 kg; four skinfolds body fat, $18.2 \pm 1.7\%$) and 13 backs (age, 27.0 ± 2.2 years; height, 180.8 ± 3.4 cm; body mass, 87.6 ± 6.7 kg; four skinfolds body fat, $14.0 \pm 2.0\%$).

The players achieved a training volume of ~ 20 h.week⁻¹ (eight rugby sessions, four strength and speed development sessions, one fitness development session, and one official game).

Study design

The study consisted of assessing the RHIE ability of the players and determining the evolution of different high-intensity efforts composing a RHIE bout. After a warm-up consisting of five minutes of muscular and joint mobilization, three minutes of athletic drills and moderate running and seven minutes of progressive accelerations, the participants performed two sprints of thirty meters at maximal velocity separated by five minutes of passive recovery. The objective of these two sprints was to evaluate the sprint force-velocity profile (FVP) of the players in non-fatigue condition (Baseline FVP). Then, the participants performed a RHIE bout composed of three different high-intensity efforts performed three times each (nine efforts in total) with twenty seconds of recovery between each. These efforts, characterized by different force and velocity productions, were, a horizontal isometric push, a 10m sled push and a 30m sprint. The performance of each of these three types of effort was measured instantaneously during the RHIE bout and at each sprint a FVP was computed. After each bout of three efforts, rate of perceived exertion (RPE) and blood lactate concentration ([La]) were evaluated. A blood lactate measurement was also performed 3 minutes after the end of the RHIE bout.

RHIE bout

The RHIE bout (figure 1) consisted of 3 repetitions (RHIE T1, RHIE T2 and RHIE T3) of a 3 high-intensity effort sequence with twenty seconds of passive recovery between each: players achieved (a) ten meters of sled push weighted at 60% of athlete's body mass, performed at maximal possible velocity, followed by ten meters of walking recovery (approximately five seconds), (b) five seconds of maximal voluntary horizontal isometric thrust followed by 25-m of low-intensity running recovery (between five

and seven seconds) and (c) thirty meters sprint, performed at maximal velocity, followed by 15-m deceleration before returning to the start of effort (a) and waiting 20 s until the next 3-efforts sequence. Each participant starts the RHIE bout in a random order and received strong verbal encouragement and feedback about each performance to avoid pacing strategies. All RHIE bouts were performed on artificial turf in no wind and dry conditions.

Sled push (a)

The sled push was considered as an effort with mixed force and velocity conditions. The mean sled velocity was $3.25 \pm 0.27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, which represents approximately 39% of V_0 . At the signal, the athlete had to complete 10m as fast as possible pushing the sled loaded to 60% of his body mass. The sled push time (in second) was measured using photoelectric cells (Brower Timing Systems, Draper, UT, USA) during RHIE T1, RHIE T2 and RHIE T3 sequences and converted into velocity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Horizontal isometric thrust (b)

The horizontal isometric thrust was a maximal force / null-velocity effort. At the signal, the athlete had to push as hard as possible in forward direction for five seconds respecting a trunk position parallel to the ground without moving the legs (without taking a foot off the ground) and arms off the ground. At the end of the five second thrust, the athlete was untied to allow him to make his active recovery to move to the next effort. The experimenter made sure that the dynamometer was tense before the thrust began. The dynamometer was attached to a rigid bar on one side, and to a rigid strap crossed at the athlete's shoulders on the other side. The isometric thrust (kg) was assessed using a dynamometer (Ergo Meter, Globus Italia, Codogno, Italy) and the maximum value recorded for further analysis.

Sprint (c)

The sprint was a high-velocity effort. The mean maximum sprint velocity was $7.78 \pm 0.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and represented approximately 91% of V_0 . During each sprint, instantaneous velocity data was measured

with a radar device (Stalker ATS Pro II, Applied Concepts, Richardson, TX, USA) attached to a tripod 5 m back to the start line at a height of 1 m corresponding approximately to the height of subjects' center of mass. Athlete's FVP profile was computed from the speed-time data using a validated field method (27, 31, 33). The theoretical maximal sprinting velocity (V_0 , $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and theoretical relative maximal horizontal force (F_0 , $\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$) were identified as the force- and velocity-intercepts of the FV relationship, respectively. The relative maximum propulsive power output (P_{max} , $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$) was calculated as $F_0 \times V_0 / 4$. The ratio of horizontal force to total force was modeled from 0.3s to the maximal velocity, with the maximal ratio of force (RFmax) being the highest value of RF (value of RF at 0.3 s). The decrement in RF (DRF) with increasing velocity was represented by the slope of the linear RF-velocity relationship. Each sprint was performed with a tripod start stance to avoid noise before sprint start.

Statistical analysis

All data are expressed as mean \pm standard deviation. The Shapiro-Wilk's tests were applied to verify the normality of the variables. Two-way ANOVAs with repeated measures were performed to determine the effect of *Position* (Forwards vs. Backs) and *time* (RHIE T1 vs RHIE T2 vs RHIE T3). When ANOVA revealed significant effects, Tuckey *post hoc* tests were applied and Cohen's d (0.2, 0.5 and 0.8 for small, medium, and large effect, respectively) effect sizes were calculated to determine the magnitude of changes. All statistical tests were performed using JASP 0.17.1 software (University of Amsterdam, Holland), and the level of significance was set at $p \leq 0.05$.

RESULTS

Evolution of high-intensity efforts performance during RHIE bout (figure 2)

No significant *time* \times *position* interactions were found concerning sled push velocity ($F_{2,46} = 0.661$, $p = 0.52$), isometric thrust ($F_{2,44} = 1.15$, $p = 0.32$), and sprint velocity ($F_{2,46} = 0.73$, $p = 0.49$). However, significant *time* effects were observed concerning sled push velocity ($F_{2,46} = 11.76$, $p < 0.001$), isometric

thrust ($F_{2,44} = 8.94$, $p < 0.001$) and sprint velocity ($F_{2,46} = 31.82$, $p < 0.001$). Sled push and sprint velocities significantly decreased between RHIE T1 and RHIE T2 ($d = 0.44$, $p < 0.033$ and $d = 0.83$, $p < 0.001$, respectively), between RHIE T2 and RHIE T3 ($d = 0.53$, $p < 0.022$ and $d = 0.76$, $p < 0.001$, respectively) as well as between RHIE T1 and RHIE T3 ($d = 0.97$, $p < 0.001$, and $d = 1.59$, $p < 0.001$, respectively). Isometric thrust significantly decreased between RHIE T1 and RHIE T3 ($d = 0.86$, $p < 0.001$), but not between RHIE T1 and RHIE T2 ($p = 0.06$) or RHIE T2 and RHIE T3 ($p = 0.06$). Significant *position* effects were also obtained in these variables with significantly higher sled push and sprint velocities in backs compared to forwards ($d = 0.41$, $p < 0.05$, and $d = 0.84$, $p < 0.001$, respectively), and significantly lower Isometric thrust in backs compared to forwards ($d = 0.77$, $p < 0.05$).

Evolution of sprint force-velocity profile parameters during RHIE bout (figure 3)

No significant *time* \times *position* interactions were found in all FVP parameters (F_0 : $F_{3,69} = 0.45$, $p = 0.72$, rF_0 : $F_{3,69} = 0.30$, $p = 0.82$, V_0 : $F_{3,69} = 1.14$, $p = 0.34$, P_{max} : $F_{3,69} = 0.27$, $p = 0.85$, rP_{max} : $F_{3,69} = 0.25$, $p = 0.86$, Sfv : $F_{3,69} = 0.51$, $p = 0.68$, RF_{max} : $F_{3,69} = 0.45$, $p = 0.72$ and DRF : $F_{3,69} = 0.49$, $p = 0.68$). However, significant *time* effects were obtained concerning V_0 ($F_{3,69} = 3.19$, $p = 0.029$), P_{max} ($F_{3,69} = 7.19$, $p < 0.001$) and rP_{max} ($F_{3,69} = 6.71$, $p < 0.001$), but not concerning F_0 ($F_{3,72} = 1.75$, $p = 0.17$), rF_0 ($F_{3,72} = 1.67$, $p = 0.18$), Sfv ($F_{3,7} = 0.10$, $p = 0.90$), RF_{max} ($F_{3,72} = 2.43$, $p = 0.07$) and DRF ($F_{3,72} = 0.16$, $p = 0.92$). V_0 was significantly lower during RHIE T2 compared to Baseline FVP ($d = 0.56$, $p = 0.042$). P_{max} and rP_{max} significantly decreased between Baseline and RHIE T2 ($d = 0.82$ and $d = 0.79$, $p < 0.001$), between Baseline and RHIE T3 ($d = 0.64$ and $d = 0.63$, $p = 0.013$) and between RHIE T1 and RHIE T2 ($d = 0.62$ and $d = 0.59$, $p = 0.017$). In addition, significant *position* effects were found in V_0 ($F_{1,23} = 13.25$, $p < 0.001$), F_0 ($F_{1,23} = 28.6$, $p < 0.001$), P_{max} ($F_{1,23} = 4.99$, $p = 0.036$), rP_{max} ($F_{1,23} = 8.66$, $p = 0.007$) and RF_{max} , ($F_{1,23} = 5.138$, $p = 0.033$, but not in rF_0 ($F_{1,23} = 2.45$, $p = 0.13$), Sfv ($F_{1,23} = 0.75$, $p = 0.39$) and DRF ($F_{1,23} = 2.5$, $p = 0.13$). While F_0 and P_{max} were significantly higher in forwards than in backs ($d = 1.07$ and $d = 0.45$,

$p < 0.001$ and $p = 0.036$, respectively), V_0 , rP_{max} and RF_{max} were significantly higher in backs than in forwards ($d = 0.73$, $d = 0.59$ and $d = 0.45$, $p < 0.001$, $p = 0.007$ and $p = 0.033$, respectively).

Evolution of blood lactate concentration and rate of perceived exertion (Table 1)

Significant *time* \times *position* interactions were found concerning RPE ($F_{2,46} = 5.71$, $p = 0.006$) and [La] ($F_{3,30} = 3.26$, $p = 0.035$). While, in backs, blood lactate significantly increased between T1 and T2, T2 and T3 and T1 and T3 ($p < 0.05$) but not between T3 and T +3', it significantly increased in forwards between T1 and T3 and T2 and T3 ($p < 0.05$). RPE significantly increased in both forwards and backs between T1 and T2 and between T2 and T3 ($p < 0.05$).

DISCUSSION

The objective of this research was to investigate how the performance of high intensity efforts with variable force and velocity conditions decrease during a RHIE bout with a main focus on alterations in sprint FVP. The main finding of this study was that the performance in the 3 types of efforts significantly decreased throughout the RHIE bout. Those decreases were similar among forwards and backs. During sprints, significant reductions in P_{max} and V_0 were observed but not for F_0 .

Both sprint, sled push and isometric thrust performances significantly and gradually decreased during the RHIE bout, in line with the results from Morel et al. (2015)(24). After a RHIE bout of 5 identical efforts (scrums, mauls or sprints) of 5 seconds interspersed with 20s of recovery, these authors reported performance decreases of $23.3 \pm 5.3\%$, $12.6 \pm 2.5\%$ and $7.3 \pm 0.9\%$ for scrums, mauls and sprints, respectively. Our results are consistent with this previous study even if the performance decreases were lower with 11.5% decrement in isometric thrust (which can be compared to scrum), 6.7% decrease in sled push velocity and 4.9% decrease in sprint velocity. In ecological conditions, *i.e.* during rugby games, RHIE bouts are not usually composed of the same types of efforts, but made up

of a mixture of these types of efforts, performed at different levels of force and velocity. Thus, our study is the first to evaluate the evolution of the performance of three types of effort under different force and velocity conditions in a random order of occurrence during a RHIE bout. In this context, these results show that even during a RHIE bout composed of random efforts, performance decreases significantly as the number of efforts increases, regardless of the force and velocity conditions of the efforts. It is interesting to note that although the frequency of the different types of high-intensity efforts is different between forwards and backs, the absence of time x position interaction suggests that the decrease in performance during a RHIE bout for both forwards and backs may follow a similar dynamic. Furthermore, it is important to take into consideration that performing some efforts can impact the intensity of subsequent different efforts. Indeed, it has been reported that contact-based RHIE bouts have a direct impact on running intensities (18, 19) and that each effort generates a specific fatigue (24) that is likely to influence the intensity of the next effort during a RHIE bout which could partly explain the lower performance decreases observed in our study.

To our knowledge, this study is the first to investigate changes in horizontal force production capabilities in sprinting during a RHIE bout in rugby union. During the RHIE bout, 4.6% and 9.3% reductions in V_0 and rP_{max} were observed between the baseline and the end of the RHIE bout. Our results are consistent and lower than previous literature that reported significant reductions in V_0 (-15.1%) and P_{max} (-20.1%) during a RSA test in rugby sevens (16). Conversely, these authors also found significant decrease in force orientation capabilities at high velocities (*i.e.*, increase in DRF) while no time effect was found concerning DRF in our study. V_0 is defined as the theoretical maximal velocity extrapolated from the linear sprint FV relationship and represents the horizontal force application capabilities of an athlete high-speed (31). These results suggest that during a sequence of repeated sprints such as a RHIE bout, high-speed horizontal force production capabilities may be impacted as well as maximum propulsive power capabilities, while low-speed horizontal force application

capabilities may be maintained in rugby players. Although changes in horizontal force application capacities during sprinting may be different on some mechanical variables (*i.e.*, position effect for V_0 , P_{max} and RF_{max}), no *time x position* interaction was observed. This suggests that during a RHIE bout, horizontal force application abilities in sprinting are similarly modified in forwards and backs with a decrease in V_0 (-8.2 % and -2.4% respectively) and rP_{max} (-10.2 and -8.8 % respectively).

Since isometric push and sled push efforts generate high neuromuscular activation perturbations (24), horizontal force application (F_0) and force orientation (RF_{max}) capabilities at low velocities were hypothesized to be significantly altered. Our results do not match this hypothesis. One possible explanation could be that since horizontal force application abilities in sprinting are related to match performance, especially with technical efficiency during opposition efforts (13), rugby players who perform a RHIE bout adopt a pacing strategy to conserve low velocity horizontal force application abilities (which are critical for performance) at the expense of high velocity force application abilities. Further studies should determine how the nature of the different efforts could differently impact the horizontal force application capacities in sprinting.

Measurements of blood lactate concentration and rate of perceived exertion were performed to better understand the causes of performance changes during the RHIE bout. Our results show a significant increase during the RHIE bout for RPE (54.9%) and [La] (154%). The values obtained are consistent with Morel et al. (2015) (24) which reported an average RPE ranging from 7.1 ± 0.5 to 7.8 ± 0.6 and a [La] ranging from $2.9 \pm 1.2 \text{ mmol.l}^{-1}$ to $9.2 \pm 1.1 \text{ mmol.l}^{-1}$ after a five effort RHIE bout. These authors observed that [La] was higher during the maul and the sprint compared to the scrum while the average RPE was significantly higher during the scrum compared to the maul and sprint. Contrary to this previous study (24), the random combination of different force and velocity efforts condition may allowed to also mix the different types of fatigue which can occur during a RHIE bout. While repeated isometric thrust could generate central fatigue related to neural activation, repeated sprints could lead to peripheral fatigue related to metabolic alterations, when the sled push may present a

mixed fatigue (23, 24). In this context, we observed that during the RHIE bout, metabolic fatigue ($[La]$) as well as perceived difficulty of exercise (RPE) increased. These results could explain the significant decrease in performance in high intensity efforts and in the mechanical properties of sprinting. Indeed, metabolic disturbances directly affect muscle contractility which has implications for the ability of athletes to maintain high levels of force under different velocity conditions. For future research, it would be interesting to verify these hypotheses and determine how during a RHIE bout, peripheral and central fatigue lead to mechanical alterations that are measured by decreases in all high intensity effort performance and changes in FV profile in sprinting, especially V_0 and P_{max} .

LIMITATIONS

The main limitations of this study are that during the RHIE bout, the players were never on the ground, which is a part of the activity of a rugby player whatever his position and contributes to the increase in fatigue. Furthermore, for the sled push, we used a fixed force condition (60% BM) for the highest possible velocity condition. Even if the sled push was performed at around 40% of the theoretical maximum velocity, we cannot completely ignore that this procedure could lead to the use of a different zone of the FV spectrum between two individuals with different characteristics. It would have been interesting to work with the percentage reduction in maximum sled push velocity, to ensure that all players performed this effort under the same force and velocity conditions.

PRACTICAL APPLICATION

It seems important for practitioners to train their athletes' RHIE ability to (i) delay the appearance of fatigue effects, and consequently (2) maintain maximum propulsive power and speed capabilities during rugby games.

CONCLUSION

This study examined how performance in different types of high-intensity effort evolved during a Repeated High-Intensity Efforts bout in rugby union players. The results showed that performance in both sprint, sled push and isometric thrust decreased significantly and progressively during the RHIE bout, irrespective of the players' positions (forwards or backs). In addition, alterations were observed in some of the sprint force-velocity profile components, including a reduction in theoretical maximum velocity (V_0) and relative maximum propulsive power (rPmax). This study highlights the importance of developing the ability to repeat high-intensity efforts to delay the effects of fatigue and maintain maximum power performance during a RHIE bout in rugby union players.

1. Austin D, Gabbett T, and Jenkins D. The physical demands of Super 14 rugby union. *J Sci Med Sport* 14: 259-263, 2011.
2. Austin D, Gabbett T, and Jenkins D. Repeated high-intensity exercise in professional rugby union. *J Sports Sci* 29: 1105-1112, 2011.
3. Black GM and Gabbett TJ. Repeated High-Intensity-Effort Activity in Elite and Semielite Rugby League Match Play. *Int J Sports Physiol Perform* 10: 711-717, 2015.
4. Coughlan GF, Green BS, Pook PT, Toolan E, and O'Connor SP. Physical game demands in elite rugby union: a global positioning system analysis and possible implications for rehabilitation. *J Orthop Sports Phys Ther* 41: 600-605, 2011.
5. Cunniffe B, Proctor W, Baker JS, and Davies B. An evaluation of the physiological demands of elite rugby union using Global Positioning System tracking software. *J Strength Cond Res* 23: 1195-1203, 2009.
6. Cunningham D, Shearer DA, Drawer S, Eager R, Taylor N, Cook C, and Kilduff LP. Movement Demands of Elite U20 International Rugby Union Players. *PLoS One* 11: e0153275, 2016.
7. Deutsch MU, Kearney GA, and Rehrer NJ. Time - motion analysis of professional rugby union players during match-play. *J Sports Sci* 25: 461-472, 2007.
8. Dubois R, Bru N, Paillard T, Le Cunuder A, Lyons M, Maurelli O, Philippe K, and Prioux J. Rugby game performances and weekly workload: Using of data mining process to enter in the complexity. *PLoS One* 15: e0228107, 2020.
9. Fornasier-Santos C, Millet GP, and Woorons X. Repeated-sprint training in hypoxia induced by voluntary hypoventilation improves running repeated-sprint ability in rugby players. *European journal of sport science* 18: 504-512, 2018.
10. Gabbett TJ. Influence of the opposing team on the physical demands of elite rugby league match play. *J Strength Cond Res* 27: 1629-1635, 2013.
11. Gabbett TJ and Gahan CW. Repeated High-Intensity Effort Activity in Relation to Tries Scored and Conceded during Rugby League Match-Play. *Int J Sports Physiol Perform* 11: 530-534, 2016.
12. Gabbett TJ, Jenkins DG, and Abernethy B. Physical demands of professional rugby league training and competition using microtechnology. *J Sci Med Sport* 15: 80-86, 2012.

13. Gabbett TJ, Stein JG, Kemp JG, and Lorenzen C. Relationship between tests of physical qualities and physical match performance in elite rugby league players. *J Strength Cond Res* 27: 1539-1545, 2013.
14. Glaise P, Rogowski I, Samozino P, Morin JB, Morel B, and Martin C. Opposition Skill Efficiency During Professional Rugby Union Official Games Is Related to Horizontal Force-Production Capacities in Sprinting. *Int J Sports Physiol Perform* 18: 918-926, 2023.
15. Hulin BT, Gabbett TJ, Kearney S, and Corvo A. Physical Demands of Match Play in Successful and Less-Successful Elite Rugby League Teams. *Int J Sports Physiol Perform* 10: 703-710, 2015.
16. Jimenez-Reyes P, Cross M, Ross A, Samozino P, Brughelli M, Gill N, and Morin JB. Changes in mechanical properties of sprinting during repeated sprint in elite rugby sevens athletes. *European journal of sport science* 19: 585-594, 2019.
17. Johnston RD and Gabbett TJ. Repeated-sprint and effort ability in rugby league players. *J Strength Cond Res* 25: 2789-2795, 2011.
18. Johnston RD, Gabbett TJ, and Jenkins DG. Influence of Number of Contact Efforts on Running Performance During Game-Based Activities. *Int J Sports Physiol Perform* 10: 740-745, 2015.
19. Johnston RD, Gabbett TJ, Seibold AJ, and Jenkins DG. Influence of physical contact on neuromuscular fatigue and markers of muscle damage following small-sided games. *J Sci Med Sport* 17: 535-540, 2014.
20. Johnston RD, Gabbett TJ, Walker S, Walker B, and Jenkins DG. Are three contact efforts really reflective of a repeated high-intensity effort bout? *J Strength Cond Res* 29: 816-821, 2015.
21. Jones MR, West DJ, Crewther BT, Cook CJ, and Kilduff LP. Quantifying positional and temporal movement patterns in professional rugby union using global positioning system. *European journal of sport science* 15: 488-496, 2015.
22. Morel B and Hautier CA. The neuromuscular fatigue induced by repeated scrums generates instability that can be limited by appropriate recovery. *Scand J Med Sci Sports* 27: 209-216, 2017.
23. Morel B, Lapole T, Liotard C, and Hautier C. Critical Peripheral Fatigue Thresholds Among Different Force-Velocity Conditions: An Individual-Based Model Approach. *Frontiers in physiology* 10, 2019.
24. Morel B, Rouffet DM, Bishop DJ, Rota SJ, and Hautier CA. Fatigue Induced by Repeated Maximal Efforts is Specific to the Rugby Task Performed. *International Journal of Sports Science & Coaching* 10: 11-20, 2015.
25. Morin JB, Edouard P, and Samozino P. Technical ability of force application as a determinant factor of sprint performance. *Med Sci Sports Exerc* 43: 1680-1688, 2011.
26. Morin JB and Samozino P. Interpreting Power-Force-Velocity Profiles for Individualized and Specific Training. *Int J Sports Physiol Perform* 11: 267-272, 2016.
27. Morin JB, Samozino P, Murata M, Cross MR, and Nagahara R. A simple method for computing sprint acceleration kinetics from running velocity data: Replication study with improved design. *J Biomech* 94: 82-87, 2019.
28. Quarrie KL and Hopkins WG. Changes in player characteristics and match activities in Bledisloe Cup rugby union from 1972 to 2004. *J Sports Sci* 25: 895-903, 2007.
29. Rabita G, Dorel S, Slawinski J, Saez-de-Villarreal E, Couturier A, Samozino P, and Morin JB. Sprint mechanics in world-class athletes: a new insight into the limits of human locomotion. *Scand J Med Sci Sports* 25: 583-594, 2015.
30. Roberts SP, Trewartha G, Higgitt RJ, El-Abd J, and Stokes KA. The physical demands of elite English rugby union. *J Sports Sci* 26: 825-833, 2008.
31. Samozino P, Rabita G, Dorel S, Slawinski J, Peyrot N, Saez de Villarreal E, and Morin JB. A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. *Scand J Med Sci Sports* 26: 648-658, 2016.

32. Sheehan A, Malone S, Weldon A, Waters A, and Collins K. An Analysis of Repeated High Intensity Efforts (RHIE) across Different Competition Levels in Elite Rugby Union. *Sports (Basel)* 10, 2022.
33. Simperingham KD, Cronin JB, Pearson SN, and Ross A. Reliability of horizontal force-velocity-power profiling during short sprint-running accelerations using radar technology. *Sports Biomech* 18: 88-99, 2019.
34. Suárez-Arrones LJ, Portillo LJ, González-Ravé JM, Muñoz VE, and Sanchez F. Match running performance in Spanish elite male rugby union using global positioning system. *Isokinetics and Exercise Science* 20: 77-83, 2012.
35. Takamori S, Hamlin MJ, Kieser DC, King D, Hume P, Yamazaki T, Hachiya M, and Olsen PD. Senior Club-Level Rugby Union Player's Positional Movement Performance Using Individualized Velocity Thresholds and Accelerometer-Derived Impacts in Matches. *J Strength Cond Res*, 2020.
36. Vachon A, Berryman N, Mujika I, Paquet JB, and Bosquet L. Fitness Determinants of Repeated High-Intensity Effort Ability in Elite Rugby Union Players. *Int J Sports Physiol Perform* 16: 1103-1110, 2021.
37. Vachon A, Berryman N, Mujika I, Paquet JB, Monnet T, and Bosquet L. Reliability of a Repeated High-Intensity Effort Test for Elite Rugby Union Players. *Sports (Basel)* 8, 2020.

FIGURES

Figure 1. Progress of a RHIE bout

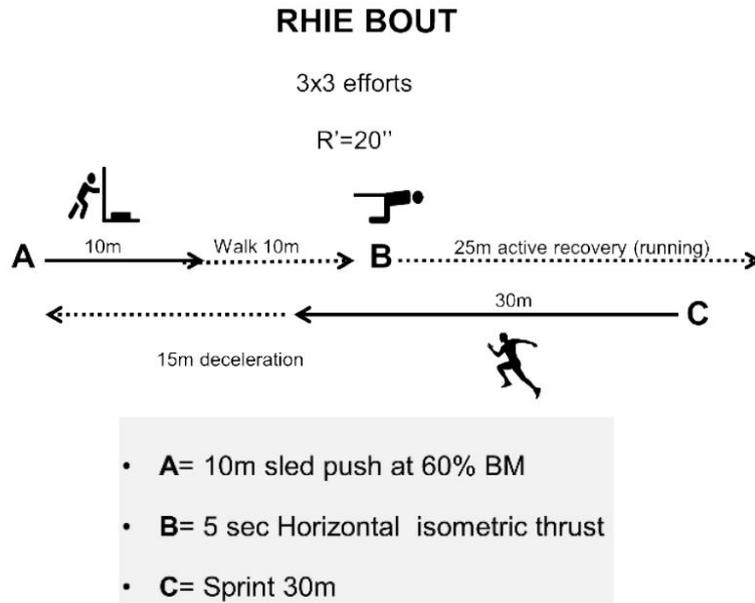
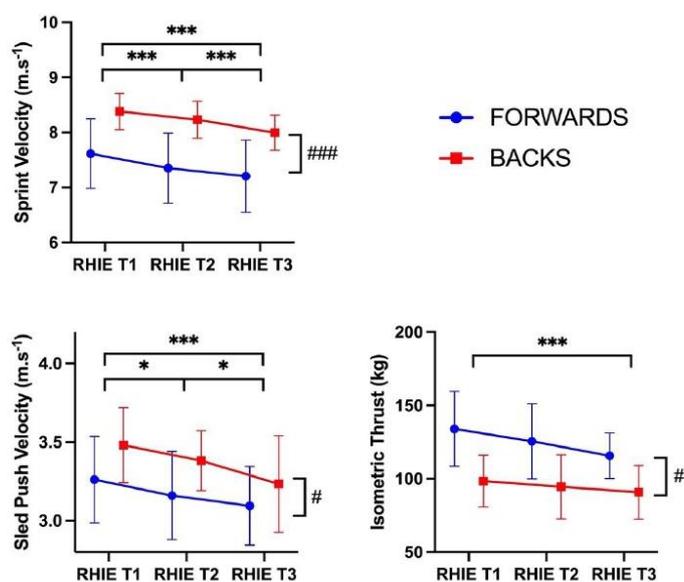
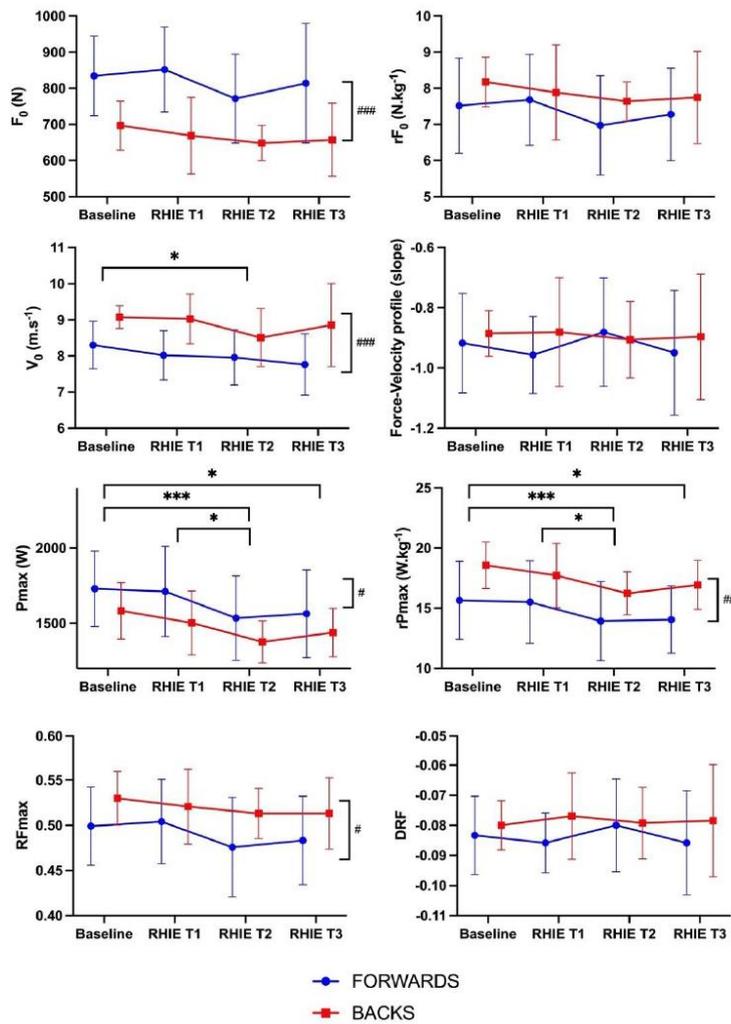


Figure 2. Sprint velocity, Sled push velocity, and isometric thrust evolutions during the 3 sequences of a RHIE bout in back and forward rugby players



Time effect : * : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$; Position effect : # : $p < 0.05$; ## : $p < 0.01$; ### : $p < 0.001$

Figure 3. Evolution of the force-velocity profile parameters at baseline and during the 3 sequences of a RHIE bout in back and forward rugby players



Time effect : * : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$; Position effect : # : $p < 0.05$; ## : $p < 0.01$;
 ### : $p < 0.001$

Table 1. Evolution of the blood lactate and rate of perceived exertion (RPE) at the end the 3 sequences of a RHIE bout and 3 minutes after the RHIE bout in back and forward rugby players

	<i>RHIE T1</i>	<i>RHIE T2</i>	<i>RHIE T3</i>	<i>RHIE +3'</i>
	[La] (mmol.l ⁻¹)			
<i>Forwards</i>	6.50 ± 1.53	7.33 ± 1.24	12.45 ± 2.26 ^{a, b}	12.93 ± 2.34 ^{a, b}
<i>Backs</i>	4.65 ± 1.50	10.65 ± 3.68 ^a	13.90 ± 3.22 ^{a, b}	13.16 ± 2.16 ^a
	<i>RPE</i>			
<i>Forwards</i>	4.83 ± 0.94	6.42 ± 0.90 ^a	8.08 ± 0.90 ^{a, b}	ND
<i>Backs</i>	4.92 ± 1.80	6.00 ± 1.35 ^a	7.07 ± 1.50 ^{a, b}	ND

a : p < 0.05 significantly different from RHIE T1; b : p < 0.05 significantly different from RHIE T2.

Discussion et perspectives

Les principaux résultats montrent que les performances mécaniques de l'ensemble des mouvements étudiés (Poussée isométrique, poussée de sled et sprint) diminuent significativement au cours d'une séquence RHIE. Nos résultats sont cohérents avec la littérature avec des diminutions de -11,5% en poussée isométrique, -6,7% en vitesse de poussée de sled et -4,9% en vitesse de sprint. **Au cours d'une séquence RHIE composée d'efforts aléatoires, la performance diminue presque linéairement à mesure que le nombre d'efforts augmente, quelles que soient les conditions de force et de vitesse caractérisant ces efforts.** Il est intéressant de noter que l'absence d'interaction temps x position suggère que la diminution de la performance mécanique au cours d'une séquence RHIE suit une dynamique similaire pour les avants comme pour les arrières.

A notre connaissance, cette étude est la première à étudier les changements dans les capacités de production de force horizontale lors d'un sprint au cours d'une séquence RHIE en rugby à XV. Pendant le RHIE, des réductions de 5.3 % et de 10.3 % de V_0 et de la P_{max} relative ont été observées entre le début et la fin de la séquence RHIE. Ces données sont cohérentes avec l'étude de Reyes et al., 2018 qui montrait des diminutions similaires de plus grande ampleur. A l'inverse, aucune évolution significative n'était constatée pour les autres composantes du profil FV en sprint (F_0 , RF_{max} , DRF et le profil FV). Ces résultats suggèrent **qu'au cours d'une séquence RHIE, les capacités de production de force horizontale à grande vitesse ainsi que les capacités de puissance propulsive maximale semblent davantage altérées alors que les capacités d'application de force horizontale à faible vitesse lors du sprint semblent être maintenues chez les joueurs de rugby.** Aucune interaction temps x position n'a été observée. Cela suggère qu'au cours d'une séquence RHIE, les capacités d'application de la force horizontale lors du sprint sont modifiées de manière similaire chez les avants comme chez les arrières.

Cette étude apporte des éléments qui permettent d'avoir une meilleure compréhension de l'impact physique des séquences RHIE en match, cependant, il serait intéressant de reproduire cette étude en ajoutant des passages au sol, qui font partie intégrante de l'activité d'un joueur de rugby, quelle que soit sa position, et contribuent à l'augmentation de la fatigue. De plus, bien que la poussée de sled ait été réalisée à

39% de la vitesse maximale théorique en sprint, il semblerait intéressant de réitérer l'expérience en normalisant la charge appliquée au sled au regard de la vitesse maximale de poussée de sled (standardiser un % de V_{max}) plutôt qu'utiliser une condition de charge correspondant à la masse corporelle (60% PDC) ; il est en effet possible que tous les joueurs ne réalisent pas cet effort dans les mêmes zones du spectre FV avec des conditions de force et de vitesse différentes.

D'autre part, des analyses complémentaires sont en cours pour identifier les corrélations potentielles entre les différentes pertes de performance observées au cours de la séquence RHIE. Par exemple pour déterminer si la diminution de puissance maximale en sprint est corrélée à la diminution de force isométrique ou de poussée de sled. De plus, pour une compréhension plus approfondie des résultats, nous adoptons actuellement une approche plus individualisée. Bien que les résultats présentés dans l'étude permettent de discuter sur les tendances générales, il reste encore à déterminer s'il existe une variabilité significative dans les réponses individuelles et, le cas échéant, si cette variabilité est interprétable d'un point de vue scientifique.

Axe 3 : Développer la capacité à répéter les efforts de haute intensité

Étude 4. Effets de l'entraînement en RHIE ou de l'entraînement en RSE sur la capacité à répéter les efforts de haute intensité et sur la performance en match chez les joueurs de rugby professionnels.

Problématique

Le rugby à XV se caractérise par des efforts de haute intensité répétés, qu'il s'agisse de courses ou d'actions de contact, avec des périodes de récupération actives ou passives de durée et d'intensité variables. Dans ce contexte, il est établi que la capacité à répéter des efforts de haute intensité est un facteur clé de la performance en rugby à XV. Plus précisément, bien que la RSa soit considérée comme une qualité physique majeure pour la performance en match (Duthie et al., 2003, Smart et al., 2014), la pratique du rugby nécessite également des efforts de contact, ce qui a conduit à une évolution du concept de RSa, appelé la capacité à répéter les efforts de haute intensité (RHIEa) qui est également considérée comme un déterminant important de la performance en rugby à XV (Hulin et al., 2015, Johnston et al., 2011). Il est donc fondamental pour les joueurs de rugby d'avoir de bonnes aptitudes en RSa et RHIEa. Ces deux qualités physiques sont considérées comme différentes (Johnston et al., 2011) et jouent un rôle majeur dans la performance en rugby alors qu'elles se développent par le biais de méthodes d'entraînement différentes. Même si les méthodes d'amélioration de la RSa ont été largement étudiées ces dernières décennies, très peu d'études ont déterminé l'efficacité de l'entraînement pour développer la RHIEa. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est de comparer les effets d'une méthode d'entraînement en répétition d'efforts à haute intensité (RHIE) ou en répétition de sprint (RSE) sur la capacité à répéter des efforts de haute intensité (RHIEa) et sur la performance en match.

Méthodes

Pour répondre à cette problématique, trente-neuf joueurs professionnels de rugby à XV ont été répartis dans trois groupes d'entraînement (entraînement RHIE, entraînement RSE et groupe contrôle). Le protocole d'intervention se déroulait en trois périodes, (i) la période de pré-training durant laquelle la RHIEa, la production d'efforts de haute intensité en match a été évaluée, (ii) la période d'entraînement, durant laquelle chaque groupe recevait 10 sessions d'entraînement spécifique (RSE, RHIE ou Contrôle) réparties sur 10 semaines, puis (iii) la période de post-training durant laquelle la RHIEa et la production d'effort de haute intensité des joueurs en match ont été réévaluées. (Figure 1 de l'article ci-dessous.)

La RHIEa était déterminée grâce à un test réadapté de Vachon et al. (2020) et de Johnston et al. (2011) qui consistait à réaliser un 12x 20m de sprint + 4m de poussée de sled (chargé à 60% du PDC) toutes les 30s. Les efforts de haute intensité en matchs étaient, quant à eux, obtenus d'une part par les centrales d'analyses cinématiques (distance, accélération et sprint) et d'autre part grâce à l'analyse notationnelle vidéo (efforts de contact).

Journal of Strength and Conditioning Research
Effects of repeated high-intensity effort training or repeated sprint training on repeated high-intensity effort ability and in-game performance in professional rugby union players
 --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	JSCR-08-19585
Full Title:	Effects of repeated high-intensity effort training or repeated sprint training on repeated high-intensity effort ability and in-game performance in professional rugby union players
Short Title:	RHIE and RSE training in rugby union
Article Type:	Original Research
Keywords:	rugby conditioning; high-intensity efforts; GPS; in-game performance
Corresponding Author:	Cyril Martin, Ph.D University of Lyon 1: Universite Claude Bernard Lyon 1 Villeurbanne, FRANCE
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	University of Lyon 1: Universite Claude Bernard Lyon 1
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Paul Glaise
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Paul Glaise Isabelle Rogowski, PhD Cyril Martin, Ph.D
Order of Authors Secondary Information:	
Manuscript Region of Origin:	FRANCE
Abstract:	This study investigated the effects of repeated high-intensity efforts (RHIE) training compared with repeated-sprint exercise (RSE) training on RHIE ability (RHIEa) and in-game performance in professional rugby union players. Thirty-nine male professional rugby union players were randomly assigned to three training groups (RHIE training, RSE training, and control). RHIEa and high-intensity effort characteristics (including sprints, acceleration, and contact efforts) during official games were measured before and after a 10-week specific (RHIE, RSE, or control) training period. Concerning RHIEa, both the RHIE and RSE training significantly increased the players' average sprint velocity, average sled push velocity, and RHIE score. RHIE training resulted in a smaller increase in average sprint velocity than RSE training; a larger increase in average sled push velocity; and a similar increase in RHIE score. Concerning in-game high-intensity efforts, while both the RHIE and RSE training produced significant improvements in total distance, acceleration, and contact rate, the number of sprints was higher only after RSE training ($p < 0.001$). Conversely, the magnitude of the increase in contact rate was almost twice as high in RHIE compared with RSE training. These findings suggest that both RSE and RHIE training are effective methods for developing RHIEa and in-game high-intensity efforts in professional rugby union. As the gains in certain abilities and game performance data differed depending on the training method chosen, we suggest that coaches choose the most appropriate method according to the profile of the players, their position, and the style of play they want to develop.
Suggested Reviewers:	Thomas T Freitas Universidad de Murcia tfreitas@ucam.edu

Powered by Editorial Manager® and ProduXion Manager® from Aries Systems Corporation

Title: Effects of repeated high-intensity effort training or repeated sprint training on repeated high-intensity effort ability and in-game performance in professional rugby union players

Running head: RHIE and RSE training in rugby union

Authors: *Paul Glaise*^{1,2}, *Isabelle Rogowski*¹, *Cyril Martin*¹

Affiliations:

¹ *Inter-university Laboratory of Human Movement Biology EA 7424, University Claude Bernard Lyon 1, University of Lyon, Lyon, France*

² *USBPA rugby – 11 avenue des sports, Bourg en Bresse, France*

Corresponding author:

Cyril Martin, Inter-university Laboratory of Human Movement Science (LIBM EA 7424),
University of Lyon, Lyon, France

Mail: cyril.martin@univ-lyon1.fr

Disclosure of funding received for this work: This study was carried out within the framework of a CIFRE agreement thesis and was supported by the French National Association for Research and Technology (ANRT).

Number of figures: 4

Number of Tables: 1

Number of Supplemental Tables: 2

Title: Effects of repeated high-intensity effort training or repeated sprint training on repeated high-intensity effort ability and in-game performance in professional rugby union players

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

ABSTRACT

1
2
3 This study investigated the effects of repeated high-intensity efforts (RHIE) training compared with
4 repeated-sprint exercise (RSE) training on RHIE ability (RHIEa) and in-game performance in professional
5 rugby union players. Thirty-nine male professional rugby union players were randomly assigned to three
6 training groups (RHIE training, RSE training, and control). RHIEa and high-intensity effort characteristics
7 (including sprints, acceleration, and contact efforts) during official games were measured before and after a
8 10-week specific (RHIE, RSE, or control) training period. Concerning RHIEa, both the RHIE and RSE
9 training significantly increased the players' average sprint velocity, average sled push velocity, and RHIE
10 score. RHIE training resulted in a smaller increase in average sprint velocity than RSE training; a larger
11 increase in average sled push velocity; and a similar increase in RHIE score. Concerning in-game high-
12 intensity efforts, while both the RHIE and RSE training produced significant improvements in total distance,
13 acceleration, and contact rate, the number of sprints was higher only after RSE training ($p < 0.001$).
14 Conversely, the magnitude of the increase in contact rate was almost twice as high in RHIE compared with
15 RSE training. These findings suggest that both RSE and RHIE training are effective methods for developing
16 RHIEa and in-game high-intensity efforts in professional rugby union. As the gains in certain abilities and
17 game performance data differed depending on the training method chosen, we suggest that coaches choose
18 the most appropriate method according to the profile of the players, their position, and the style of play they
19 want to develop.
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

INTRODUCTION

1
2
3
4
5
6 Rugby union is an opposition sport characterized by repeated high intensity running and contact efforts,
7
8 separated by recovery periods of random duration and intensity (37). The forwards are mostly involved in
9
10 contact efforts and cover short distances, while the backs produce high-intensity running and cover large
11
12 distances (28). Despite the game's demands strongly depending on the player's playing position (33), the
13
14 performance of repeated high-intensity efforts is a key factor in winning games in rugby union (1).
15
16 Consequently, designing training programs to improve players' ability to repeat high-intensity efforts may
17
18 be crucial regardless of their playing position.
19
20

21
22 In recent decades, the ability to repeat sprints has been considered a major determinant of performance in
23
24 team sports (3, 21, 30). Repeated-sprint ability (RSa) is defined as the ability to reproduce maximum or
25
26 near-maximum intensity in brief efforts (<10 s), interspersed with short periods of incomplete recovery
27
28 (usually <90 s) (21). In rugby union, RSa is also a key performance factor (12), as players with a high RSa
29
30 perform more actions per time unit (36). In forwards, higher RSa levels are associated with more combat
31
32 actions and accelerations (i.e., <3 m.s²), while in backs RSa is correlated with high-speed running (i.e., >21
33
34 km.h⁻¹) and sprint efforts (i.e., >25 km.h⁻¹) (22). Consequently, RSa is a determinant of in-game performance
35
36 for all players in a rugby union team.
37
38
39
40

41
42 Rugby playing also requires contact efforts, leading to an evolution of the RSa concept, which first appeared
43
44 in rugby league (2), then in rugby sevens (7), and more recently in rugby union (35) – namely repeated-
45
46 high-intensity effort ability (RHIEa). A repeated-high-intensity effort (RHIE) is defined as a sequence of
47
48 three or more intense efforts interspersed with less than 21 s of recovery (2, 4). In team sports, such as rugby
49
50 union, RHIEa is considered a crucial element (24) and appears to be more relevant than RSa for assessing
51
52 players' performance (25). Intense efforts include accelerations ($\geq 2.79 \text{ m.s}^{-2}$), high-speed running ($> 5.0 \text{ m.s}^{-1}$),
53
54 and contact efforts (e.g., tackles, rucks, or mauls) (1, 2, 19). In a game of rugby union, the occurrence
55
56 and nature of RHIE bouts depend on the position of players. Forwards perform more RHIE (i.e., 11–21
57
58 bouts) compared with backs (2–18 bouts) in combat-based RHIE bouts, whereas backs produce more run-
59
60
61
62
63
64
65

1 based RHIE bouts (2). More specifically, the back rows perform more RHIE than other forwards (9 ± 5
2 RHIE per game), while centers and the back three (both 18 ± 6 RHIE per game) achieve more RHIE than
3 other backs as well as the whole team (35). The average duration of an RHIE bout is between 26 ± 4 s (in
4 inside backs) and 52 ± 7 s (in back rows) (2). Furthermore, in rugby league, winning teams perform more
5 RHIE bouts in the entire game, especially before conceding tries compared with losing teams which
6 achieved more RHIE bouts before scoring tries (16). This suggests that high RHIE activity in winning teams
7 also contributes to more solid defenses which are harder to beat (18). These findings emphasize that RHIE
8 bouts often occur at critical periods during games as well as confirm the importance of developing RHIEa
9 in rugby union players.
10

11 Because of their different nature, and because contact efforts generate additional fatigue that strongly
12 impacts running intensities (27) and tackle skill efficiency (17), RSa and RHIEa must be considered two
13 distinct physical qualities; thus, they require specific training methodologies (25). Concerning repeated-
14 sprint exercise (RSE) training, linear sprint repetition is more effective than high-intensity aerobic interval
15 training for aerobic and football-specific adaptations (13). Repeated shuttle sprints also efficiently improved
16 RSa with a $2.61 \pm 2.8\%$ time decrease in a repeated shuttle-sprint ability test (6). In rugby union, the number
17 of sprints performed during an RSa test was reported to increase by 64% after seven RSE training sessions
18 in hypoventilation-induced hypoxia (15). While methods for improving RSa through RSE training have
19 been extensively studied in team sports, including rugby union (3, 5, 6, 15), additional knowledge is required
20 concerning training methods aimed at improving RHIEa. Regarding RHIE training, Vachon et al. (45)
21 recently demonstrated that RHIEa is improved by aerobic training coupled with speed training during HIIT
22 block training (38). Despite these recent data, the effects of RHIE training on RHIEa and game performance
23 remain insufficiently explored. In addition, high-intensity repetition training programs based on sprinting
24 (RSE training) and on alternating high-intensity running and contact efforts (RHIE training) generate
25 specific adaptations in RSa and RHIEa, respectively. However, the efficiency of these methods for
26 developing RHIEa has never been compared, and whether these training methods differentially impact in-
27 game efforts in a rugby union competitive situation remains unknown.
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 Therefore, the present study aimed to determine whether RSE training and RHIE training differently
2 modulate (i) RHIEa and (ii) the production of high-intensity running and contact efforts in competitive game
3 situations. We hypothesized that RSE training and RHIE training would be equivalently effective at
4 improving RHIEa, with larger improvements for repeated sprints with RSE training, and also that RHIE
5 training would more strongly improve repeated contact effort performance. Furthermore, we hypothesized
6 that both training programs would produce similar improvements in game situations in terms of the
7 production of high-intensity running and contact efforts.
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18

19 **METHODS**

20 **Study design**

21
22 A test–retest procedure was applied over 26 weeks divided into three periods (Figure 1). The first period
23 was the pre-training period from the 1st to the 7th weeks, during which the in-game performance was recorded
24 based on six official competitive games and the RHIEa was assessed between weeks 4 and 5. The second
25 period lasted from the 8th to the 17th weeks and corresponded to the training period during which 10 sessions
26 of specific training were performed (i.e., RSE, RHIE, or regular training). Lastly, the third period lasted
27 from the 18th to the 26th weeks and was the post-training period, during which the in-game performance was
28 recorded based on seven official competitive games and the RHIEa was assessed between weeks 17 and 19.
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44

45 **Population**

46
47 Thirty-nine male professional rugby union players (age, 26.4 ± 4.2 yr; height, 184.4 ± 7.6 cm; body mass,
48 97.2 ± 15.5 kg; four-skinfold body fat, $15.7 \pm 4.1\%$) playing in the second XXX National division (XXX
49 division) were included in this study and randomly divided into the following three groups (Table 1): (i) the
50 RHIE group ($n = 16$, with nine forwards and seven backs); (ii) the RSE group ($n = 15$, with eight forwards
51 and seven backs); and (iii) the control (CONT) group ($n = 8$, with five forwards and three backs). Each
52 participant achieved a training volume of approximately 20 h/week^{-1} in 14 weekly sessions (eight rugby
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 sessions, four strength and speed development sessions, one fitness development session, and one official
2 game). Each participant agreed to participate in the study and signed an informed consent form. The study
3 received institutional ethics approval and used safe procedures for the participants.
4
5
6
7
8
9

10 **Training interventions**

11
12 During all three experimental periods (pre-training, training and post-training), the three groups participated
13 in 8–14 joint training sessions per week divided into three to six conditioning sessions and five to eight
14 rugby team or line sessions per week. During the training period, additional specific sessions were
15 implemented according to the training group as follows.
16
17
18
19
20
21

22
23 In the RSE group, players performed 10 training sessions (one per week), which consisted of repeating two
24 series of RSE in addition to the usual team training. Each RSE series was composed of sets of four to six
25 20-m maximal sprints with a start every 15 to 20 s (6, 25). Each participant from the RSE group completed
26 at least 7 of the 10 training sessions.
27
28
29
30
31
32

33 In the RHIE group, players performed 10 training sessions (one per week), which consisted of repeating
34 two series of RHIE exercise in addition to the usual team training. Each RHIE series was composed of sets
35 of four to six efforts of 3–6 s of high-intensity running (accelerations $>3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ and high-velocity running >5
36 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and contact efforts (tackles, mauling tasks, and wrestling) with a start every 15 to 20 s (25, 40). Each
37 participant from the RHIE group completed at least 7 of the 10 training sessions.
38
39
40
41
42
43
44

45 In the CONT group, players did not receive any RHIE- or RSE-specific training and only completed the
46 usual team training. During the RHIE and RSE training series, the CONT group participated in
47 compensatory skill training drills.
48
49
50
51
52

53 To ensure that the training load was similar between the three groups, external load was measured during
54 the training period with Global Positioning System (GPS) units (Catapult Innovations, Melbourne,
55 Australia). The total achieved distance and the total PlayerLoad[®] produced during the training period were
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

monitored. The average playing time was also calculated as the total playing time per player during the whole study.

RHIEa assessment

The ability to repeat high-intensity efforts was evaluated through the RHIEa test (Figure 2). This test was adapted from the one proposed by Vachon et al. (2020) (40), which was derived from the test performed by Johnston and Gabbet (2011) (25). It consists of performing 10 repetitions of the following 30-s sequence: (a) a 20-m sprint at maximal velocity from a tripod starting position; (b) a 10-m deceleration; (c) when the timer reaches 10 s, a 4-m sled push weighted at 60% of the player's body mass; and (d) a 32-m active recovery (low-intensity running) moving back to the start for the next sequence.

The test was performed on artificial turf in dry windless conditions. The times for the 20-m sprint and the 4-m sled push were measured with photoelectric cells (Brower Timing Systems, Draper, UT, USA) for each set. The players were instructed not to consume caffeine during the 48 h prior to the test.

To avoid the pacing strategy, each participant performed two trials of 20-m sprints with maximal intensity at the end of a warm-up, which was composed of 8 min of muscular work and moderate-intensity running followed by 7 min of incremental accelerations. The minimal time was used as the sprint reference. To ensure that the player produced a maximum effort from the first sequence of the RHIEa test, a tolerance of 5% of the time reference was accepted. Otherwise, the RHIEa test was stopped and restarted after 5 min of passive recovery. During the test, the participants were instructed to perform each effort with maximal intensity under strong vocal encouragement and received oral feedback on their performance in each sprint and sled push.

Six indicators were computed from the RHIE test performance. The average velocity over the 10 sprints of 20 m (ASV: average sprint velocity in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) was calculated as follows: $\text{ASV} = 20 / (\text{mean of 10 sprint times})$. The average velocity over the 10 sled pushes of 4 m (ASPV: average sled push velocity in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) was calculated as follows: $\text{ASPV} = 4 / (\text{mean of 10 sled push times})$. The sprint velocity decrement (Sdec

in %) was computed as follows: $S_{dec} = \left(\frac{(S1+S2+S3...+S10)}{10 \cdot S_{best}} - 1 \right) * 100$. The sled push velocity decrement (SPdec) in % was calculated as follows: $SP_{dec} = \left(\frac{(P1+P2+P3...+P10)}{10 \cdot P_{best}} - 1 \right) * 100$. Two composite RHIEa indicators were proposed from these data, namely the RHIEa score, which was defined as $ASV \times ASPV$, and the RHIEa decrement score (RHIEa dec), which was defined as $RHIEa \text{ dec} = \frac{(S_{dec} + SP_{dec})}{2}$.

In-game match data

Only data from players who participated on the field for at least 30 min in each game were included in the study. Velocity and acceleration data were measured using GPS units (an integrating accelerometer and a gyroscope) during the six games of the pre-training period and the seven matches of the post-training period. The time and position were recorded using a GPS unit (sampling rate: 10 Hz) fixed between the scapulae. Accelerations were recorded with a GPS-integrated triaxial accelerometer (sampling rate: 1 KHz). The total distance per minute ($D \cdot \text{min}^{-1}$, $m \cdot \text{min}^{-1}$), number of runs over 80% of the participant's maximum velocity per minute ($S \cdot \text{min}^{-1}$ in $\text{nb} \cdot \text{min}^{-1}$), and number of accelerations higher than $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ per minute ($A \cdot \text{min}^{-1}$ in $\text{nb} \cdot \text{min}^{-1}$) were obtained from the software provided by the manufacturer (Openfield 3.4.0, Catapult, Melbourne, Australia).

During each of these official games, individual player activities were evaluated by video analysis (Sportscode, Jeddah, Saudi Arabia). Regardless of success or failure, all participations in tackle attempts, offensive and defensive rucks, mauls, scrums, and carry events attempted with the ball in hand leading to a contact were counted for each player. The numbers of occurrences were summed and expressed relative to the player's playing time on the field to define the contact rate. These data were recorded by a single observer who was unaware that his coding would be used in the study. The intra-session reliability was checked using the intra-class correlation coefficient (ICC; confidence interval at the 95% confidence level) for all events for the contact rate. The ICC values were 0.998 (0.995; 0.999) for tackles, 0.998 (0.996; 0.999) for rucks, and 1 for scrum, maul, and duel events. Then, all data from games 1–6 in the pre-training period and from

games 15–21 in the post-training period were averaged over the corresponding period and used for the subsequent analysis.

Statistical analysis

All data are expressed as mean \pm standard deviation. The Shapiro–Wilk test was performed to verify the normality of the variables. One-way analyses of variance (ANOVAs) were applied to determine the effect of *group* (CONT vs. RSE vs. RHIE) on external load and playing time. Furthermore, two-way ANOVAs with repeated measures were performed to determine the effects of training (*group*: CONT vs. RSE vs. RHIE), *time* (pre- vs. post-training), and *group*time* interaction on running and rugby performance. If the ANOVAs revealed significant effects, Tukey’s post-hoc test was applied and Cohen’s *d* (0.2, 0.5, and 0.8 for small, medium, and large effects, respectively) effect sizes were calculated to determine the magnitude and practical relevance of changes. All statistical tests were performed using the Statistica 13.2 software package (StatSoft Inc., Tulsa, USA), and the level of significance was set at $p \leq 0.05$.

RESULTS

Anthropometrics, training load, and playing time

No significant differences in age ($p = 0.15$), height ($p = 0.69$), body mass ($p = 0.81$), or four-skinfold body fat ($p = 0.23$) were observed between the three groups (Table 1). Total distance over the training period ($p = 0.26$), total PlayerLoad[®] ($p = 0.36$), and playing time ($p = 0.24$) were similar for the three groups.

RHIEa test

Regarding the RHIEa test results (Figure 3, Suppl. Table 1), an ANOVA revealed a significant effect of *group*time* interaction on ASV ($F_{(2,36)} = 3.5$, $p = 0.036$), ASPV ($F_{(2,36)} = 6.81$, $p = 0.003$), and RHIEa score ($F_{(2,36)} = 8.92$, $p < 0.001$). ASV, ASPV, and RHIEa score significantly increased between the pre- and post-

1 training periods in the RHIE and RSE groups (large effects, $p < 0.05$ for all), but not in the CONT group.
 2 The ASV training-induced increase was larger in the RSE group ($d = 1.579$) than in the RHIE group ($d =$
 3 1.093). Conversely, the training-induced increases of ASPV and RHIEa score were larger in the RHIE group
 4 than in the RSE group ($d = 1.498$ and $d = 1.191$ for ASPV, respectively; and $d = 1.937$ and $d = 1.571$ for
 5 RHIEa score, respectively).
 6
 7
 8
 9

10
 11 Concerning Sdec and RHIEa dec, ANOVA revealed a significant *time* effect only ($F_{(1,36)} = 7.03$ and
 12 $F_{(1,36)} = 5.54$, respectively; $p < 0.05$). Furthermore, post-training Sdec and RHIEa dec were significantly
 13 lower than the respective pre-training values ($p < 0.05$). In addition, the effect of RHIE training on RHIEa
 14 dec was large ($d = 0.825$) and tended to be significant ($p = 0.063$).
 15
 16
 17
 18
 19
 20
 21
 22
 23
 24

25 **High-intensity efforts in game**

26
 27 Regarding all of the in-game high-intensity effort variables (Figure 4), ANOVA revealed significant
 28 *group * time* effects on $S \cdot \text{min}^{-1}$ ($F_{(2,36)} = 8.127$, $p = 0.002$), $D \cdot \text{min}^{-1}$ ($F_{(2,36)} = 8.93$, $p < 0.001$), $A \cdot \text{min}^{-1}$
 29 ($F_{(2,36)} = 23.71$, $p < 0.001$), and contact rate ($F_{(2,36)} = 41.69$, $p < 0.001$). While $A \cdot \text{min}^{-1}$ significantly decreased
 30 ($d = 0.91$, $p < 0.001$) between the pre- and post-training periods in the CONT group, $S \cdot \text{min}^{-1}$, $D \cdot \text{min}^{-1}$, and
 31 contact rate remained similar ($p > 0.05$ for all variables). Conversely, significant increases were observed
 32 in the RHIE and RSE groups (large effects and $p < 0.05$ for all). These increases were higher in the RHIE
 33 group than in the RSE group for $D \cdot \text{min}^{-1}$ ($d = 1.511$ and $d = 1.34$, respectively) and contact rate ($d = 2.395$
 34 and $d = 0.922$, respectively), similar for $A \cdot \text{min}^{-1}$ ($d = 1.589$ and $d = 1.623$, respectively), and lower for $S \cdot \text{min}^{-1}$
 35 ($d = 0.839$ and $d = 1.127$, respectively).
 36
 37
 38
 39
 40
 41
 42
 43
 44
 45
 46
 47
 48
 49
 50

51 **DISCUSSION**

52
 53 The aim of this study was to investigate the effects of RHIE training and RSE training on RHIEa and in-
 54 game high-intensity efforts in professional rugby union players. The main findings were that both the RHIE
 55 and RSE training programs led to significant improvements in RHIEa and in-game high-intensity efforts.
 56 However, while gains in ASV were higher in the RSE group compared with the RHIE group, training-
 57
 58
 59
 60
 61
 62
 63
 64
 65

1 induced increases in ASPV and RHIEa score were higher in the RHIE group compared with the RSE group.
2 Concerning high-intensity efforts in game, training-induced increases in D_{\min}^{-1} and contact rate were
3 higher in the RHIE group compared with the RSE group.
4
5
6

7 A previous study demonstrated that gains in RSa were obtained after sprint repetition training (3). Thus, as
8 demonstrated by Buchheit et al. (2010), RSa significantly improves after a repeated-sprint training program
9 by both reducing the average sprint time and the best sprint time (6). Similar results were observed in our
10 study, with a 4.14% mean improvement in ASV after RSE training. However, whether RSE training could
11 improve the RHIEa in rugby union was unknown. Noteworthy, RSE training resulted in increased ASPV
12 and RHIE scores (+4.41% and +9.08%, respectively), which highlights that such training was also effective
13 at improving several determinants of RHIEa. While the effects of RSE training methods have been
14 extensively studied in team sports (3, 5), no longitudinal study had demonstrated that RSE training could
15 improve players' performance in-game high-intensity efforts in rugby union. Our results indicated that RSE
16 training induced significant increases in in-game high-intensity efforts, including higher distance and
17 contact rate and more sprints and accelerations. These results are consistent with those of Glaize et al. (2022),
18 who demonstrated that increases in RSa levels correlated with the number of sprints, accelerations, and
19 contact situations in rugby union (22). RSa has also been related to a higher activity ratio (i.e., the number
20 of actions per time unit) (36) and to the number of RHIE bouts produced in rugby league games (20),
21 confirming that the development of this physical ability may be a determinant of rugby union performance.
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40

41 Literature on the effects of RHIE training on RHIEa and in-game performance is highly limited. Our
42 results revealed that ASV, ASPV, and RHIE score were significantly higher after RHIE training (+ 3.07%,
43 + 8.11%, and +11.13%, respectively). These results agree with those of a previous study (38), which
44 demonstrated that RHIEa could be improved using a HIIT rugby block preceded by a preconditioning
45 contact sequence or a preconditioning running sequence, with significant improvements in total sprint
46 time and 20-m sprint time. Our results also indicated that RHIE training significantly increased in-game
47 high-intensity efforts. These results are consistent with those of Vachon et al. (2021), who revealed that the
48 number of sprints at $\geq 90\%$ of the maximum velocity of a player in a rugby union game was significantly
49 increased after 4 weeks of a HIIT training block, including preconditioning running and contact sequences
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

(38). Our results thus reinforce the statement that RHIEa may directly influence the performance in in-game high-intensity efforts, which can immediately affect the success of an action (9) or a game (11, 20).

Whether RSE and RHIE training differentially impact RHIEa and in-game high-intensity efforts was unknown. Although our results indicated that these two training methods have positive effects on RHIEa and in-game efforts, differences were observed between the two training methods when considering the relative improvements in RHIEa. While the gains in ASV were higher in the RSE group than in the RHIE group, improvements in ASPV were higher in the RHIE group compared with the RSE group. These results could be explained by the different nature of the efforts used in the training programs. RSa and RHIEa should be considered two distinct physical abilities as they can differently influence performance (25). As previously demonstrated (26, 27), contact efforts (which are included in RHIE training) generate additional fatigue, which strongly impacts players' running intensities; conversely, significant improvements in RSa but not in intense neuromuscular efforts were found after repeated sprint shuttle training (6). The effects of including preconditioning combat or preconditioning running before high-intensity interval training on RHIEa were recently compared (39): Sdec improvements were higher in the study's preconditioning sprint group compared with its preconditioning combat group. Our results demonstrated a large effect, although a non-significant one, of RHIE training on RHIEdec ($d = 0.825$, $p = 0.063$). This absence of a significant difference could be explained by high individual variability. Moreover, the absence of relationships with performance decrements could be related to the indicator's poor reliability (32). In addition, our results partly confirmed those of Fomasier-santos et al. (2018) (15), who did not measure any significant improvement in the number of sprints (i.e., >85% max velocity) performed after repeated-sprint training in normoxia; conversely, a significantly higher number of sprints (i.e., >85% max velocity) was observed after repeated-sprint training in hypoxia. Taken together, our results suggest that RHIEa can be improved in different components depending on the chosen training method. In rugby union, as large differences exist in activity profiles according to the player's playing position (33) and profile, we suggest that practitioners should choose a method of training that is relevant to the requirements of each player.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Furthermore, the magnitude of the effects of the RSE and RHIE methods also appear to be different concerning high-intensity efforts in rugby union games. While the effects of RSE and RHIE training on accelerations were similar, RHIE training resulted in a larger increase in total distance compared with RSE training. More interestingly, while increases in the number of sprints were higher after RSE training than after RHIE training, increases in training-induced contact rate were almost double after RHIE training compared with RSE training. These results suggest that RHIE training could be more effective at increasing the occurrence of combat actions, while RSE could be more effective at increasing the occurrence of sprints. In line with previous publications, RHIE training can be considered to possibly (i) improve the ability of players to repeat contact efforts and thus (ii) directly influence the success of a match (34), as winning teams in Super Rugby perform more tackles than losing teams. Furthermore, as the contact phases concern all players (10) and particularly forwards (8), it could be relevant to propose RHIE training to the players according to their position and requirements. If the aim is to improve the RSa (which could be more relevant for backs), RSE training may be more beneficial than RHIE. Conversely, for players who require more combat sequences (which is the case for forwards), RHIE training could be more suitable, as the ability to repeat sled push-type efforts (inducing higher levels of strength for a lower-velocity condition) is improved more by RHIE training.

The different nature of efforts performed in RSE and RHIE programs induce specific physiological adaptations (31). RHIE training uses different types of efforts, particularly contact and running efforts, which lead to mixed fatigue related to both the perturbation of muscle activation and metabolic fatigue (31). Such training allows players to limit performance decrements in intense neuromuscular efforts (e.g., the sled push) and thus to be less impacted by the repetition of contact efforts in game (as observed with the significant reduction of SPdec for RHIE training in our study). By contrast, RSE training, exclusively based on high-intensity running repetition, leads to metabolic fatigue related to the decrease of PCr, inorganic phosphate accumulation, and H^+ increase (29). This method allows players to increase their average velocity in high-intensity efforts, such as sprints, which facilitates improvements in acceleration and sprinting repetition in rugby union games. One can hypothesize that physiological adaptations to RHIE and RSE

1 training could also lead to higher levels of horizontal strength in sprinting and contact actions, which would
2 make players more efficient in contact bouts (23). One can also hypothesize that while RSE training allows
3 players to improve their RHIEa by improving their capacities to produce and repeat intense running efforts,
4 RHIE training improves the ability to repeat contact efforts, which could make players' running efforts less
5 limited by contact-induced fatigue.
6
7
8
9

10
11
12
13
14 One of the main limitations of this study was that it did not evaluate the technical dimensions provided by
15 the different training programs. Indeed, the contact efforts that were part of the RHIE training program could
16 have improved the players' technical abilities, which could have influenced their ability to use their energy
17 during contact bouts and thus to achieve more in game. Moreover, although a large sample of games was
18 used, it cannot be completely excluded that the results could have been influenced by the level of the
19 opponents (18) as well as the competition level (14). Thus, the results should not be generalized to other
20 levels of rugby practice or other types of rugby. In addition, as our results were obtained from one team, it
21 is possible that the results might have been different with teams practicing a different style of play.
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31

32
33
34
35
36 In conclusion, this study has demonstrated that the RSE and RHIE methods are effective for developing
37 RHIEa and players' activity in rugby union games. As the gains in some abilities and game performance
38 depended on the training method administered, we suggest that strength and conditioning coaches choose
39 the most appropriate method according to the player's profile and playing position as well as the team's
40 playing strategies.
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51

52 **References**

- 53 1. Austin D, Gabbett T, and Jenkins D. The physical demands of Super 14 rugby union. *J Sci Med Sport*
54 14: 259-263, 2011.
- 55 2. Austin D, Gabbett T, and Jenkins D. Repeated high-intensity exercise in professional rugby union.
56 *J Sports Sci* 29: 1105-1112, 2011.
57
58
59
60
61
62
63
64
65

- 1 3. Bishop D, Girard O, and Mendez-Villanueva A. Repeated-sprint ability - part II: recommendations
2 for training. *Sports Med* 41: 741-756, 2011.
- 3 4. Black GM and Gabbett TJ. Repeated High-Intensity-Effort Activity in Elite and Semielite Rugby
4 League Match Play. *Int J Sports Physiol Perform* 10: 711-717, 2015.
- 5 5. Brocherie F, Girard O, Faiss R, and Millet GP. Effects of Repeated-Sprint Training in Hypoxia on Sea-
6 Level Performance: A Meta-Analysis. *Sports Med* 47: 1651-1660, 2017.
- 7 6. Buchheit M, Mendez-Villanueva A, Delhomel G, Brughelli M, and Ahmaidi S. Improving repeated
8 sprint ability in young elite soccer players: repeated shuttle sprints vs. explosive strength training.
9 *J Strength Cond Res* 24: 2715-2722, 2010.
- 10 7. Couderc A, Gabbett TJ, Piscione J, Robineau J, Peeters A, Igarza G, Thomas C, Hanon C, and Lacomme
11 M. Repeated High-Intensity Effort Activity in International Male Rugby Sevens. *J Strength Cond
12 Res*, 2019.
- 13 8. Cunniffe B, Proctor W, Baker JS, and Davies B. An evaluation of the physiological demands of elite
14 rugby union using Global Positioning System tracking software. *J Strength Cond Res* 23: 1195-1203,
15 2009.
- 16 9. den Hollander S, Brown J, Lambert M, Treu P, and Hendricks S. Skills Associated with Line Breaks
17 in Elite Rugby Union. *Journal of sports science & medicine* 15: 501-508, 2016.
- 18 10. Deutsch MU, Kearney GA, and Rehrer NJ. Time - motion analysis of professional rugby union
19 players during match-play. *J Sports Sci* 25: 461-472, 2007.
- 20 11. Dubois R, Bru N, Paillard T, Le Cunuder A, Lyons M, Maurelli O, Philippe K, and Prioux J. Rugby
21 game performances and weekly workload: Using of data mining process to enter in the complexity.
22 *PLoS One* 15: e0228107, 2020.
- 23 12. Duthie G, Pyne D, and Hooper S. Applied physiology and game analysis of rugby union. *Sports Med*
24 33: 973-991, 2003.
- 25 13. Ferrari Bravo D, Impellizzeri FM, Rampinini E, Castagna C, Bishop D, and Wisloff U. Sprint vs.
26 interval training in football. *Int J Sports Med* 29: 668-674, 2008.
- 27 14. Fornasier-Santos C, Millet GP, Stridgeon P, Girard O, Brocherie F, and Nottin S. High-intensity
28 Activity in European vs. National Rugby Union Games in the best 2014-2015 Team. *Int J Sports Med*
29 42: 529-536, 2021.
- 30 15. Fornasier-Santos C, Millet GP, and Woorons X. Repeated-sprint training in hypoxia induced by
31 voluntary hypoventilation improves running repeated-sprint ability in rugby players. *European
32 journal of sport science* 18: 504-512, 2018.
- 33 16. Gabbett TJ. Influence of the opposing team on the physical demands of elite rugby league match
34 play. *J Strength Cond Res* 27: 1629-1635, 2013.
- 35 17. Gabbett TJ. Influence of Fatigue on Tackling Ability in Rugby League Players: Role of Muscular
36 Strength, Endurance, and Aerobic Qualities. *PLoS One* 11: e0163161, 2016.
- 37 18. Gabbett TJ and Gahan CW. Repeated High-Intensity Effort Activity in Relation to Tries Scored and
38 Conceded during Rugby League Match-Play. *Int J Sports Physiol Perform* 11: 530-534, 2016.
- 39 19. Gabbett TJ, Jenkins DG, and Abernethy B. Physical demands of professional rugby league training
40 and competition using microtechnology. *J Sci Med Sport* 15: 80-86, 2012.
- 41 20. Gabbett TJ, Stein JG, Kemp JG, and Lorenzen C. Relationship between tests of physical qualities
42 and physical match performance in elite rugby league players. *J Strength Cond Res* 27: 1539-1545,
43 2013.
- 44 21. Girard O, Mendez-Villanueva A, and Bishop D. Repeated-sprint ability - part I: factors contributing
45 to fatigue. *Sports Med* 41: 673-694, 2011.
- 46 22. Glaise P, Morel B, Rogowski I, Cornu B, and Martin C. Influence of Repeated-Sprint Ability on the
47 in-Game Activity Profiles of Semiprofessional Rugby Union Players According to Position. *Front
48 Sports Act Living* 4: 857373, 2022.
- 49 23. Glaise P, Rogowski I, Samozino P, Morin J-B, Morel B, and Martin C. Opposition skill efficiency
50 during semi-professional rugby union official games is related to horizontal force production
51 capacities in sprinting. *International Journal of Sports Physiology and Performance* Ahead of Print,
52 2023.
- 53
- 54
- 55
- 56
- 57
- 58
- 59
- 60
- 61
- 62
- 63
- 64
- 65

- 1 24. Hulin BT, Gabbett TJ, Kearney S, and Corvo A. Physical Demands of Match Play in Successful and
2 Less-Successful Elite Rugby League Teams. *Int J Sports Physiol Perform* 10: 703-710, 2015.
- 3 25. Johnston RD and Gabbett TJ. Repeated-sprint and effort ability in rugby league players. *J Strength*
4 *Cond Res* 25: 2789-2795, 2011.
- 5 26. Johnston RD, Gabbett TJ, and Jenkins DG. Influence of Number of Contact Efforts on Running
6 Performance During Game-Based Activities. *Int J Sports Physiol Perform* 10: 740-745, 2015.
- 7 27. Johnston RD, Gabbett TJ, Seibold AJ, and Jenkins DG. Influence of physical contact on
8 neuromuscular fatigue and markers of muscle damage following small-sided games. *J Sci Med*
9 *Sport* 17: 535-540, 2014.
- 10 28. Jones MR, West DJ, Crewther BT, Cook CJ, and Kilduff LP. Quantifying positional and temporal
11 movement patterns in professional rugby union using global positioning system. *European journal*
12 *of sport science* 15: 488-496, 2015.
- 13 29. Lacombe M, Piscione J, Hager JP, and Bourdin M. A new approach to quantifying physical demand
14 in rugby union. *J Sports Sci* 32: 290-300, 2014.
- 15 30. Le Rossignol P, Gabbett TJ, Comerford D, and Stanton WR. Repeated-sprint ability and team
16 selection in Australian football league players. *Int J Sports Physiol Perform* 9: 161-165, 2014.
- 17 31. Morel B, Rouffet DM, Bishop DJ, Rota SJ, and Hautier CA. Fatigue Induced by Repeated Maximal
18 Efforts is Specific to the Rugby Task Performed. *International Journal of Sports Science & Coaching*
19 10: 11-20, 2015.
- 20 32. Oliver JL. Is a fatigue index a worthwhile measure of repeated sprint ability? *J Sci Med Sport* 12:
21 20-23, 2009.
- 22 33. Pollard BT, Turner AN, Eager R, Cunningham DJ, Cook CJ, Hogben P, and Kilduff LP. The ball in play
23 demands of international rugby union. *J Sci Med Sport* 21: 1090-1094, 2018.
- 24 34. Sella FS, McMaster DT, Serpiello FR, and La Torre A. Match analysis in Rugby Union: performance
25 indicators of Rugby Championship and Super Rugby teams. *J Sports Med Phys Fitness* 59: 1306-
26 1310, 2019.
- 27 35. Sheehan A, Malone S, Weldon A, Waters A, and Collins K. An Analysis of Repeated High Intensity
28 Efforts (RHIE) across Different Competition Levels in Elite Rugby Union. *Sports (Basel)* 10, 2022.
- 29 36. Smart D, Hopkins WG, Quarrie KL, and Gill N. The relationship between physical fitness and game
30 behaviours in rugby union players. *European journal of sport science* 14 Suppl 1: S8-17, 2014.
- 31 37. Takamori S, Hamlin MJ, Kieser DC, King D, Hume P, Yamazaki T, Hachiya M, and Olsen PD. Senior
32 Club-Level Rugby Union Player's Positional Movement Performance Using Individualized Velocity
33 Thresholds and Accelerometer-Derived Impacts in Matches. *J Strength Cond Res*, 2020.
- 34 38. Vachon A, Berryman N, Mujika I, Paquet JB, and Bosquet L. Fitness Determinants of Repeated High-
35 Intensity Effort Ability in Elite Rugby Union Players. *Int J Sports Physiol Perform* 16: 1103-1110,
36 2021.
- 37 39. Vachon A, Berryman N, Mujika I, Paquet JB, and Bosquet L. Preconditioning Activities to Enhance
38 Repeated High-Intensity Efforts in Elite Rugby Union Players. *Int J Sports Physiol Perform* 17: 871-
39 878, 2022.
- 40 40. Vachon A, Berryman N, Mujika I, Paquet JB, Monnet T, and Bosquet L. Reliability of a Repeated
41 High-Intensity Effort Test for Elite Rugby Union Players. *Sports (Basel)* 8, 2020.
- 42
- 43
- 44
- 45
- 46
- 47
- 48
- 49
- 50
- 51
- 52
- 53
- 54
- 55
- 56
- 57
- 58
- 59
- 60
- 61
- 62
- 63
- 64
- 65

Figure legends

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Figure 1. Study design

Figure 2. RHIE ability test

Figure 3. Performance indices in the repeated high-intensity effort (RHIE) ability test between pre- and post-training periods in the control (CONT), repeated-sprint exercise (RSE), and RHIE training groups

Figure 4. In-game high intensity effort between pre- and post-training periods in the control (CONT), repeated-sprint exercise (RSE), and repeated high-intensity effort (RHIE) training groups

Figure 1

[Click here to access/download;Figure;Figure 1.jpg](#)

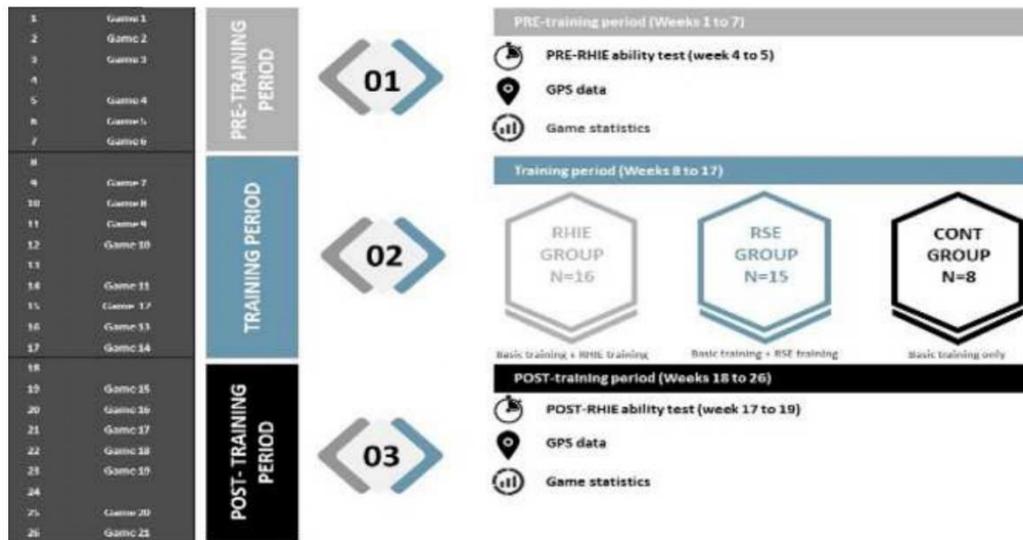


Figure 2

[Click here to access/download;Figure;Figure 2.jpg](#)

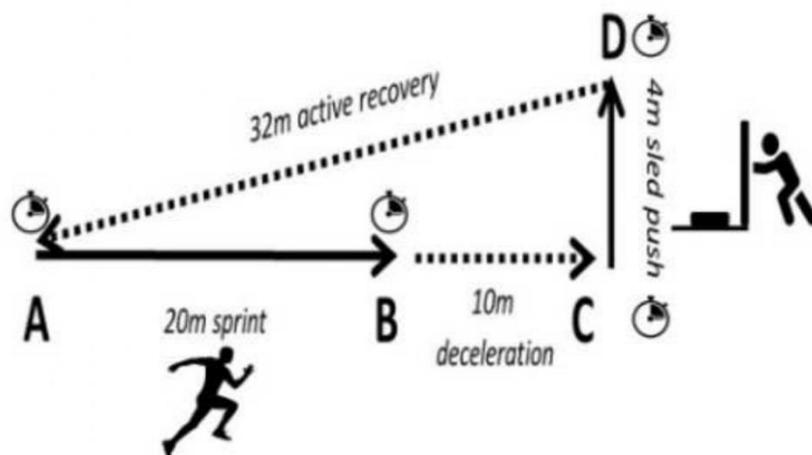


Figure 3

[Click here to access/download;Figure;Figure 3.jpg](#)

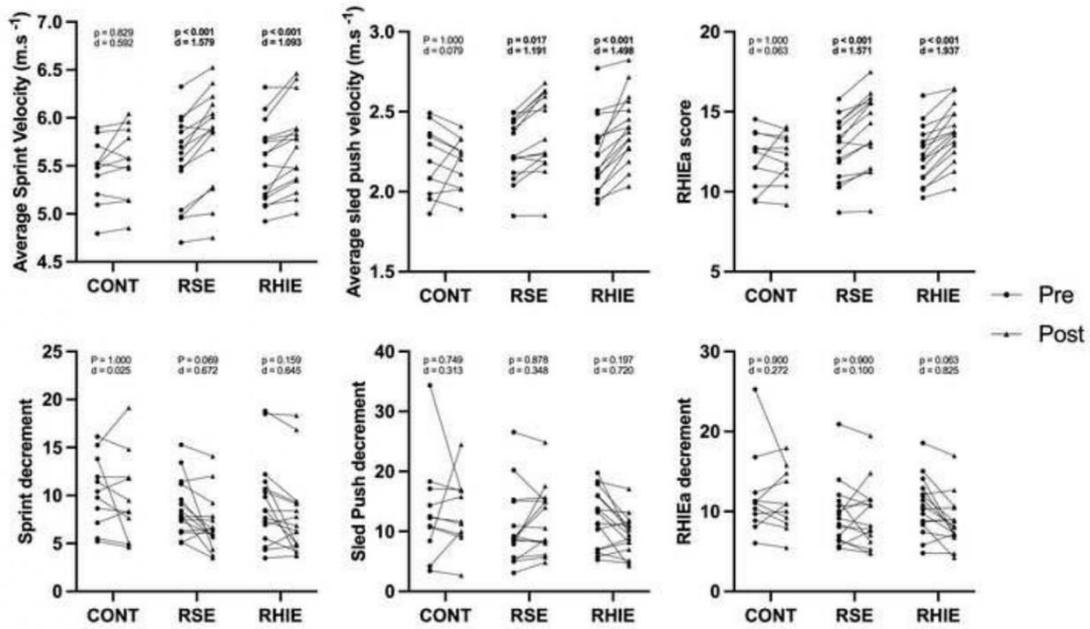


Figure 4

[Click here to access/download;Figure;Figure 4.jpg](#)

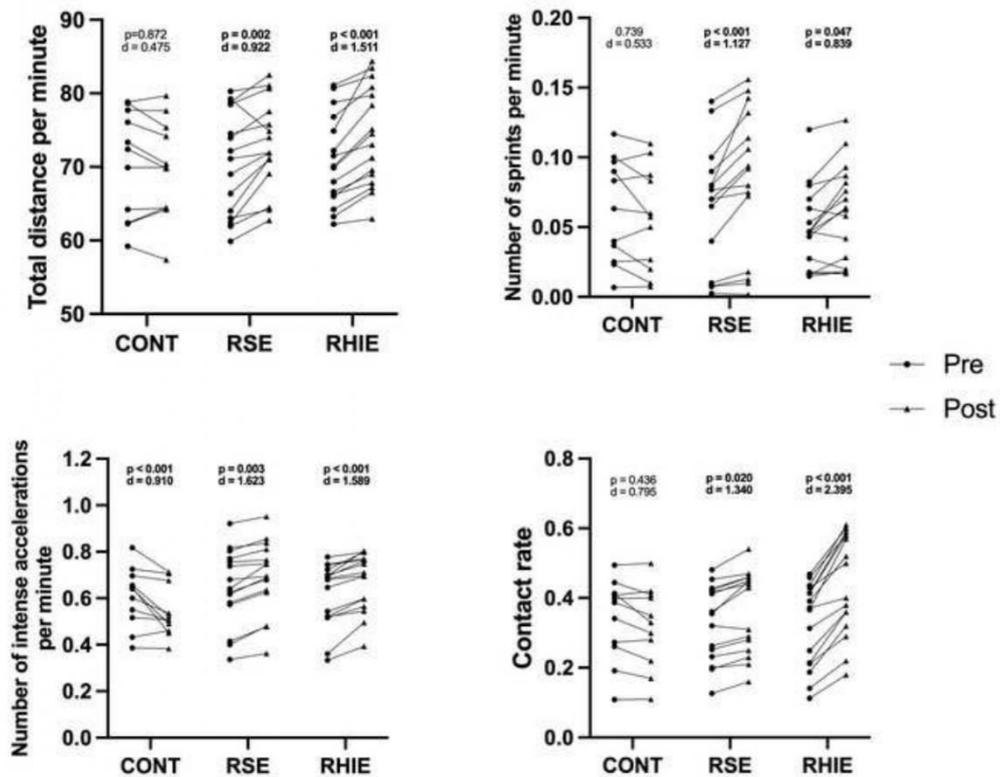


Table 1. Mean (\pm standard deviation) of anthropometric, training load, and playing time characteristics for the repeated high-intensity exercise (RHIE), repeated sprint exercise (RSE), and control (CONT) groups

	RHIE	RSE	CONT	F	p
<i>n</i>	16	15	8		
<i>Age (years)</i>	28.4 \pm 3.4	25.9 \pm 4.1	25.6 \pm 4.6	F (2,36) = 1.96	0.15
<i>Height (cm)</i>	183.3 \pm 9.4	185.1 \pm 8.1	182.4 \pm 5.3	F (2,36) = 0.36	0.69
<i>Body mass (kg)</i>	97.5 \pm 16.8	97.5 \pm 16.8	99.7 \pm 11.9	F (2,36) = 0.21	0.81
<i>Four-skinfolds body fat (%)</i>	15.9 \pm 4.4	15.2 \pm 3.5	17.4 \pm 4.3	F (2,36) = 1.50	0.23
<i>Average playing time (min)</i>	643 \pm 185	699 \pm 130	589 \pm 92	F (2,37) = 1.46	0.24
<i>Total distance on training period (m)</i>	82,368 \pm 34,215	76,561 \pm 34,924	59,055 \pm 21,495	F (2,37) = 1.39	0.26
<i>Total PlayerLoad \otimes on training period (A.U.)</i>	7957 \pm 3149	7293 \pm 3754	5932 \pm 2210	F (2,37) = 1.03	0.36

Suppl. Table 1. Performance indices in the repeated high-intensity effort (RHIE) ability test between pre- and post-training periods in the control (CONT), repeated-sprint exercise (RSE), and RHIE training groups

	Pre-training period	Post-training period	p value	Cohen's d
Average sprint velocity (ASV, m.s⁻¹)				
<i>RHIE group</i>	5.53 \pm 0.41	5.70 \pm 0.44*	p < 0.001	1.093
<i>RSE group</i>	5.56 \pm 0.46	5.79 \pm 0.51*	p < 0.001	1.579
<i>CONT group</i>	5.34 \pm 0.32	5.42 \pm 0.35	p = 0.829	0.592
Average sled push velocity (ASPV, m.s⁻¹)				
<i>RHIE group</i>	2.22 \pm 0.23	2.40 \pm 0.21*	p < 0.001	1.498
<i>RSE group</i>	2.27 \pm 0.19	2.37 \pm 0.25*	p = 0.017	1.191
<i>CONT group</i>	2.17 \pm 0.23	2.16 \pm 0.17	p = 1.000	0.079
RHIEa score				
<i>RHIE group</i>	12.31 \pm 1.75	13.68 \pm 1.75*	p < 0.001	1.937
<i>RSE group</i>	12.67 \pm 1.96	13.82 \pm 2.39*	p < 0.001	1.571
<i>CONT group</i>	11.69 \pm 1.78	11.74 \pm 1.49	p = 1.000	0.063
Sprint decrement (Sdec)				
<i>RHIE group</i>	9.28 \pm 4.47	7.81 \pm 4.29	p = 0.159	0.645
<i>RSE group</i>	8.77 \pm 2.97	7.02 \pm 2.89	p = 0.069	0.672
<i>CONT group</i>	10.91 \pm 3.69	10.97 \pm 4.52	p = 1.000	0.026
Sled push decrement (SPdec)				
<i>RHIE group</i>	12.04 \pm 4.78	9.45 \pm 3.32	p = 0.197	0.720
<i>RSE group</i>	10.58 \pm 6.29	11.83 \pm 5.51	p = 0.878	0.348
<i>CONT group</i>	14.70 \pm 8.87	12.56 \pm 3.32	p = 0.749	0.313
RHIEa decrement				
<i>RHIE group</i>	10.66 \pm 3.51	8.63 \pm 3.06	p = 0.063	0.825
<i>RSE group</i>	9.68 \pm 3.98	9.43 \pm 4.04	p = 0.999	0.100
<i>CONT group</i>	12.80 \pm 5.70	11.78 \pm 3.65	p = 0.900	0.272

Values expressed as mean \pm SD.

Suppl Table 2. In-game high intensity effort between pre- and post-training periods in the control (CONT), repeated-sprint exercise (RSE), and repeated high-intensity effort (RHIE) training groups

	Pre-training period	Post-training period	p value	Cohen's d
Number of sprints per minute (S.min⁻¹)				
<i>RHIE group</i>	0.049 ± 0.029	0.061 ± 0.035	p = 0.047	0.839
<i>RSE group</i>	0.065 ± 0.043	0.084 ± 0.052	p < 0.001	1.127
<i>CONT group</i>	0.065 ± 0.039	0.058 ± 0.036	p = 0.739	0.533
Total distance per minute (D.min⁻¹) (m.min⁻¹)				
<i>RHIE group</i>	70.8 ± 6.2	74.2 ± 6.6	p < 0.001	1.511
<i>RSE group</i>	70.4 ± 7.1	72.9 ± 6.1	p = 0.002	0.922
<i>CONT group</i>	69.9 ± 7.3	68.9 ± 6.9	p = 0.872	0.475
Number of intense accelerations per minute (A.min⁻¹)				
<i>RHIE group</i>	0.62 ± 0.14	0.67 ± 0.13	p < 0.001	1.589
<i>RSE group</i>	0.65 ± 0.17	0.69 ± 0.16	p = 0.003	1.623
<i>CONT group</i>	0.60 ± 0.14	0.53 ± 0.11	p < 0.001	0.910
Contact rate				
<i>RHIE group</i>	0.32 ± 0.12	0.44 ± 0.15	p < 0.001	2.395
<i>RSE group</i>	0.33 ± 0.11	0.36 ± 0.12	p = 0.020	1.340
<i>CONT group</i>	0.37 ± 0.10	0.34 ± 0.11	p = 0.436	0.795

Values expressed as mean ± SD.

Discussion et perspectives

Les principaux résultats montrent des gains similaires au test de RHIEa (Vitesse de sprint moyenne, vitesse de poussée de sled moyenne, et RHIE score) ainsi que dans les efforts de haute intensité en match (Distance, accélération, sprint et efforts de contact) après un entraînement en RSE comme en RHIE. Ces données suggèrent que **les entraînements en RHIE et RSE sont d'une efficacité similaire pour améliorer la RHIEa et les efforts de haute intensité en match.**

Nos résultats soulignent également que l'amplitude des améliorations des efforts utilisant la vitesse (Vitesse de sprint moyenne, nombre de sprint en match) était supérieure après l'entraînement en RSE, alors que l'amplitude des améliorations des efforts résistés et de contacts (Vitesse moyenne de poussée de sled, efforts de contact) était plus importants après l'entraînement en RHIE. Il semblerait donc que **les meilleures améliorations dans les efforts de vitesse soient obtenues après un entraînement en RSE, contrairement à l'entraînement en RHIE, qui permettrait d'obtenir des plus grandes améliorations des efforts résistés et de contact.**

En termes d'applications pratiques, comme les gains de certaines capacités et les données de performance en match diffèrent selon la méthode d'entraînement choisie, nous suggérons aux entraîneurs de choisir la méthode la plus appropriée en fonction du profil des joueurs, de leur position et du style de jeu qu'ils veulent développer.

Pour confirmer ces résultats, il pourrait être intéressant de mesurer les progrès techniques dans les efforts de contact au cours de la période d'entraînement (notamment pour l'entraînement RHIE) pour s'assurer que la progression dans le nombre d'efforts de contact réalisés en match ne soit pas due à une amélioration technique mais bien physiologique. Dans le même esprit, des reproductions de cette étude seraient importantes pour augmenter le nombre d'observations et diminuer l'influence tactique et stratégique d'une seule équipe.

DISCUSSION GENERALE

L'objectif général de cette thèse était d'identifier les relations entre divers aspects de la performance en rugby à XV et la capacité à produire et répéter les efforts de haute intensité en situation écologique. Nous avons organisé ce projet de recherche en trois axes successifs afin de mieux caractériser ces potentielles relations. Dans le premier axe, nous avons tenté de déterminer dans quelles mesures une meilleure capacité à **produire** des efforts de haute intensité pouvait améliorer la performance en match. Dans le deuxième axe, nous avons cherché à comprendre comment la capacité à **répéter** des efforts de haute intensité pouvait être déterminante pour la performance en rugby à XV. Enfin, basés sur les résultats des deux premiers axes, il nous semblait intéressant de chercher comment **développer** cette capacité à répéter des efforts de haute intensité, et de mesurer l'impact des méthodes d'entraînement sur la performance en compétition. Ces trois axes de recherches ont été soutenus par quatre projets expérimentaux qui ont permis de fournir des informations essentielles sur la relation entre la production de force horizontale pendant le sprint, la capacité à répéter des sprints (i.e, RSA), la capacité à répéter des efforts de haute intensité (RHIEa) et le développement de ces deux qualités physiques et la performance en match de rugby à XV. Dans cette discussion générale, nous allons relier ces résultats et discuter de leurs implications globales pour la préparation physique et l'entraînement des joueurs de rugby à XV.

Relation entre capacité d'application de force horizontale en sprint et Performance en Rugby

Dans une première étude, nous avons révélé des relations significatives entre certaines propriétés mécaniques en sprint et des indicateurs clés de la performance en rugby à XV. Nos résultats ont montré une forte corrélation entre le niveau de puissance propulsive maximale en sprint et la performance des joueurs dans des situations de contact telles que les plaquages, les rucks et les duels offensifs. Ces observations confirment les conclusions d'études antérieures selon lesquelles la puissance des membres inférieurs influence la performance technique, comme le nombre de duels offensifs gagnés et de défenseurs battus chez les avants en rugby à XV (Smart et al., 2014) ou de duels offensifs gagnés chez les joueurs de rugby à XIII (Gabbett et al., 2007). De plus, nous avons observé que l'efficacité sur ces efforts de

contact était nettement reliée à la capacité de production (F_0) et d'orientation (RF_{max}) de force horizontale à basse vitesse. Ces résultats suggèrent que la capacité d'application de force horizontale, en particulier à faible vitesse, joue un rôle clé dans la capacité des joueurs à réussir ces actions de contact. De plus, cette corrélation était présente aussi bien chez les avants que chez les arrières, soulignant ainsi l'importance de ce facteur de performance pour tous les postes. Comme RF_{max} est un déterminant de F_0 (Morin et al., 2011, Morin et al., 2012), et que F_0 est un déterminant majeur de l'accélération en sprint, notamment sur courte distance (Samozino et al., 2022), nous pouvons considérer que nos résultats confirment les observations rapportées par Smart et al. (2014) qui montrent que la performance en sprint sur une courte distance (10 m) est associée au nombre de franchissements et au nombre de défenseurs battus chez les joueurs de rugby à XV. D'un point de vue pratique, ces observations confirment qu'en rugby à XV, la capacité d'un joueur à réaliser des variations de vitesse (*i.e.*, accélérations) importantes est davantage déterminante que sa capacité à atteindre une vitesse maximale élevée. D'autre part, alors que les relations entre la force maximale dans le plan vertical (en back squat par exemple) et l'accélération et l'efficacité au contact est déjà connue, nos résultats soulignent l'importance de développer la capacité des joueurs à produire un haut niveau de force maximale sur le plan horizontal. D'après nos résultats, cela pourrait se traduire par l'amélioration (i) des qualités intrinsèques de la force maximale de l'athlète et (ii) de sa capacité technique qui lui permettrait d'orienter une plus grande proportion de la force de réaction du sol, et donc contribuer à l'amélioration de la force horizontale appliquée. Pour obtenir ces améliorations, l'entraînement en sprint résisté est considéré comme une méthode pertinente, car elle permet de développer à la fois le niveau de force horizontale ainsi que la capacité d'orientation de force (Lahti et al., 2020).

Importance de la Capacité à Répéter des Efforts de Haute Intensité

Toutefois, lors d'un match de rugby à XV, les joueurs ne produisent pas des efforts de haute intensité de façon isolée, et sont amenés à reproduire ces efforts avec des récupérations courtes et incomplètes. Dans une deuxième étude, nous avons mis en évidence l'importance de la capacité à répéter des sprints (RSa) pour la performance en rugby à XV. Les résultats ont montré que la RSa était corrélée à la performance en match, notamment en ce qui concerne les accélérations et les efforts de contact chez les avants et la distance parcourue à haute vitesse, la fréquence des sprints et la

distance totale parcourue chez les arrières. Ces tendances étaient confirmées lorsque l'on subdivisait les joueurs en quatre sous-groupes. Ainsi, chez les joueurs du cinq de devant, la RSa était liée au nombre d'accélération et aux actions de contact, tandis que chez les troisièmes lignes, elle était corrélée à la distance parcourue et à la fréquence des efforts de contact. A l'inverse, pour les arrières intérieurs, la RSa présentait une corrélation significative avec la distance totale parcourue, le nombre d'accélération et la distance parcourue à haute vitesse lorsque, chez les arrières extérieurs, la RSa était associée à la fréquence des sprints ainsi qu'à la vitesse maximale atteinte au cours des matchs. Ces résultats mettent en évidence que la RSa est liée à la performance en match, à la fois de manière générale, indépendamment du poste sur le terrain, et de manière spécifique en fonction du profil d'activité associé à chaque poste. Il semble que des niveaux plus élevés de RSa soient corrélés à une meilleure performance en match en ce qui concerne les indicateurs clés propres à chaque poste, ce qui complète les informations disponibles dans la littérature qui montrent que la RSa est liée à une plus grande distance parcourue à haute vitesse pour tous les joueurs en rugby à XIII (Gabbett et al., 2013) et qui est corrélée au ratio d'activité (i.e. nombre d'actions par unité de temps) et au nombre de plaquages réussis chez les avants en rugby à XV (Smart et al., 2014). En d'autres termes, on peut considérer la RSa comme un déterminant majeur de la performance en rugby à XV, et son impact est adapté aux exigences particulières de chaque position. D'un point de vue pratique, bien que la RSa soit régulièrement entraînée chez les rugbymans professionnels au travers des entraînements en RSE, la question de la pertinence de ce type d'entraînement concernant les spécificités de certains postes (comme les avants) fait toujours débat. Dans ce contexte, nos résultats complètent la littérature existante et montrent qu'un bon niveau de RSa peut être bénéfique pour la performance en match quel que soit le poste de jeu. Toutefois, cela ne signifie pas qu'il n'existe pas d'autres qualités physiques plus importantes pour la spécificité de la performance dans la mesure où, d'après la littérature, nous savons que la RHIEa est considérée par certains auteurs comme plus pertinente pour évaluer les capacités physiques spécifiques des joueurs de rugby.

Dans la première étude nous avons observé que les capacités de production de force horizontale en sprint étaient déterminantes de la performance en match, et dans la deuxième étude, nous avons confirmé que la RSa était un facteur de performance

important en rugby à XV. Toutefois, le rugby n'étant pas uniquement un sport de déplacement, mais également de contact, des études récentes, notamment issues du rugby à XIII, ont remis en question la pertinence de la RSa et ont suggéré que la capacité à répéter des efforts de haute intensité (RHIEa), incluant des courses et des contacts à haute intensité, est une qualité plus spécifique et discriminante pour la performance au rugby à XV. Cependant, il y a encore peu d'études sur cette qualité physique dans le rugby à XV, et des questions restent à explorer, notamment sur la caractérisation de la fatigue au cours d'une séquence RHIE. Basés sur ces constats, il nous semblait fondamental d'explorer la capacité à répéter des efforts de haute intensité (RHIEa) et plus particulièrement, de nous intéresser à l'impact des séquences de répétition d'efforts de haute intensité sur la performance caractérisant ces efforts et notamment les propriétés mécaniques en sprint. Ainsi, dans cette troisième étude, nous avons examiné comment la fatigue engendrée par une séquence RHIE influençait la production de force horizontale pendant un sprint, et la performance d'un effort isométrique et résisté. Les résultats ont montré une diminution significative du niveau de performance dans l'ensemble des efforts réalisés à mesure que la séquence RHIE progressait. Ces données venaient confirmer les résultats avancés par Morel et al. (2015) qui rapportaient également des diminutions de performances sur l'ensemble des efforts (isométrique, résisté et sprint) au cours de cinq répétitions du même effort. Nous avons également mis en évidence des altérations du profil FV en sprint au cours de la séquence RHIE, avec des réductions notables de la vitesse maximale théorique de sprint (V_0) et de la puissance propulsive maximale relative (rP_{max}) chez les avants comme chez les arrières. Contrairement à nos hypothèses émises, ces observations confirmaient les résultats avancés par Reyes et al. (2018) qui rapportaient des altérations de V_0 et de P_{max} lors d'un test de répétition de sprint. Même si ce type d'entraînement est aujourd'hui beaucoup utilisé dans les équipes professionnelles, nos résultats suggèrent que les préparateurs physiques devraient accorder une attention particulière au développement de la RHIEa des joueurs de rugby professionnels dans l'optique de retarder les effets de la fatigue centrale et métabolique, et ainsi maintenir un niveau maximal d'intensité dans les différents types d'efforts rencontrés lors d'un match. Parallèlement, l'amélioration de la RHIEa permettrait de maintenir les capacités maximales de puissance propulsive d'un athlète, qui se sont avérées être déterminantes dans la performance en rugby à XV.

Comparaison des Méthodes d'Entraînement

Les études deux et trois ont permis d'identifier que la RSA et que la RHIEa pouvaient jouer un rôle déterminant dans la performance en rugby à XV. Toutefois, bien que la RSA ait été beaucoup étudiée en sport collectif, elle est considérée par certains auteurs comme moins pertinente que la RHIEa pour évaluer la capacité à répéter des efforts de haute intensité chez les joueurs de rugby. Cependant, les effets des méthodes de développement de la RHIEa sont encore très peu documentés dans la littérature scientifique. Basés sur ces constats, dans la quatrième étude, nous avons comparé l'efficacité de deux méthodes d'entraînement en répétition d'effort de haute intensité : l'entraînement en répétition de sprint (RSE) et l'entraînement en répétition d'efforts à haute intensité (RHIE) pour améliorer la capacité à répéter des efforts de haute intensité (RHIEa) et la performance en match. Les résultats ont montré que les deux méthodes étaient efficaces pour améliorer la RHIEa, mais qu'elles avaient des effets spécifiques sur certains aspects de la performance en match. Ces observations confirment les résultats avancés dans la littérature précédente, qui a déjà montré l'efficacité de l'entraînement en RSE (Buchheit et al., 2010, Fornasier-santos et al., 2018) et en RHIE (Vachon et al., 2021) dans les sports collectifs. L'entraînement en RSE semblait favoriser les améliorations dans les efforts contenant de la vitesse (tels que les sprints et les accélérations), tandis que l'entraînement en RHIE était plus efficace pour obtenir de plus grandes améliorations dans les efforts résistés et de contact. Ces résultats soulignent l'importance de choisir une méthode d'entraînement adaptée aux besoins spécifiques des joueurs en fonction de leur poste et de leur style de jeu. Ces informations semblent importantes dans la préparation physique actuelle, où le développement de ces qualités physiques représente un enjeu central dans l'amélioration des performances en rugby. Dans ce contexte, notre étude met à disposition des éléments qui peuvent aider les staffs à prendre des décisions adaptées et davantage individualisées sur les programmes d'entraînements des joueurs de rugby.

Réflexion générale et limites

En entreprenant cette thèse, notre volonté était d'apporter des éléments de réponses à des questions appliquées au terrain, et utilisables par les professionnels sur la

thématique des efforts de haute intensité qui possède encore beaucoup de zones à explorer. Ces travaux expérimentaux ont permis d'apporter de nouvelles informations pratiques concernant les liens entre des facteurs de performances liés à la production et à la répétition d'efforts de haute intensité en rugby à XV. Toutefois, en abordant ce projet, nous savions qu'il serait difficile de maintenir des conditions parfaitement contrôlées et qu'il faudrait s'adapter à de nombreux facteurs incontrôlables (blessures, résultats, dynamique d'équipe, stratégies...). Dans ce contexte, il nous semble important de nous questionner sur nos recherches, en mettant en perspective certains éléments qui nous amènent à considérer nos résultats avec prudence et humilité. Ainsi, lors de nos quatre projets expérimentaux, nos échantillons de sujets étaient uniquement des joueurs de l'équipe première du club de l'USBPA. Bien que le plus grand nombre de facteurs confondants aient été contrôlés, nous nous demandons dans quelles mesures le profil de l'équipe, le niveau de compétition, le style de jeu pratiqué, l'entraînement pratiqué (Lahti et al., 2020), la dynamique de la période étudiée et les qualités techniques intrinsèques des joueurs peuvent contribuer aux résultats. Dans la première étude, nous avons évalué le profil FV des joueurs à une seule reprise, sur une période de 12 matchs, or nous savons que ce profil FV peut varier au cours d'une saison (Jimenez-Reyes et al., 2022). Ces résultats auraient-ils été similaires à une autre période ? Dans quelle mesure le climat météorologique associé à la période étudiée peut modifier le style de jeu pratiqué et les intensités de déplacement en match et ainsi modifier les résultats ? Par ailleurs, lors de l'étude 2, en raison de blessures, nous avons réalisé une partie de nos analyses avec un petit échantillon de sujet. Bien que les résultats présentés étaient statistiquement significatifs, nous ne pouvons pas occulter le fait qu'ils pourraient être dus à une variabilité inter-individuelle. Nous avons retrouvé cette difficulté au cours de l'étude quatre, dans laquelle certaines de nos analyses statistiques ne ressortaient pas significatives en raison de cette variabilité inter-individuelle. A ce jour, nos résultats ne peuvent que nous alerter sur certaines relations entre plusieurs facteurs de performances, et doivent être interprétés comme des tendances qui ouvrent de nouvelles perspectives. Il serait donc intéressant de poursuivre ce travail de recherche et de répliquer ces études afin d'augmenter le nombre d'observations et de sujets, pour en tirer de solides conclusions indépendantes d'un maximum de facteurs décrits ci-dessus.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'ensemble de ces quatre études a contribué à éclairer certains aspects déterminants de la performance en rugby à XV, en mettant l'accent sur les facteurs physiologiques et biomécaniques liés à la production et à la répétition des efforts de haute intensité. Nos observations permettent d'envisager certaines implications pratiques dans les domaines de la préparation physique et de l'entraînement en général, et plus particulièrement dans le cadre du développement des qualités physiques et de l'optimisation des méthodes d'entraînement.

Les résultats de notre première étude ont permis de montrer que les capacités à **produire** et appliquer un grand niveau de force à basse vitesse en sprint étaient déterminantes dans la performance en rugby à XV, en particulier dans les actions de contact. Cette étude était la première à relier de la performance en sprint en ligne droite avec de la performance non linéaire en situation écologique. Du point de vue pratique, ces éléments sont importants car avec les outils technologiques disponibles (My sprint, Radar, 1080 motion) et les méthodes de traitement fiables (Samozino et al., 2016), l'évaluation du profil FV en sprint est devenu accessible pour un grand nombre de professionnels. Parmi les implications pratiques, on retrouve :

- Le développement de ces capacités d'application de force horizontale à basse vitesse : Les joueurs devraient inclure des exercices visant à améliorer leur capacité à produire une force horizontale élevée à faible vitesse (F_0) dans leur programme d'entraînement. L'entraînement en sprint résisté semble être une méthode appropriée. Cela peut être particulièrement bénéfique pour les actions de contact telles que les plaquages, les rucks et les duels offensifs. D'autre part, l'entraînement de ces propriétés mécaniques en sprint permet d'entraîner un facteur de performance majeur, dans une plus grande spécificité du mouvement et non plus uniquement sur de l'entraînement dissocié (Musculature sur le plan vertical).
- L'élargissement du champ d'action des préparateurs physiques, qui peuvent maintenant développer ces propriétés mécaniques en sprint en connaissant l'incidence que cela pourrait avoir sur le terrain.
- L'évaluation et le suivi régulier des propriétés mécaniques en sprint devraient prendre une place importante dans l'entraînement des joueurs de rugby professionnels, dans la mesure où le niveau de performance dans certaines propriétés mécaniques serait un bon indicateur de la performance en compétition.
- L'ouverture scientifique sur de nouvelles relations possibles entre performance en sprint linéaire et performance en situation écologique en sport collectif.

Du point de vue scientifique, cette étude nous offre de larges perspectives de recherches, dans lesquelles nous pourrions intégrer des efforts supplémentaires (comme les franchissements ou les chasses après jeu au pied) afin d'intégrer dans l'analyse différentes conditions de force et de vitesse. De plus, un projet de recherche ultérieur serait de caractériser le profil force vitesse d'un joueur *in situ*, et d'identifier les conditions de force et de vitesse des différentes actions (plaquage, ruck, franchissement...).

Dans la deuxième étude, la capacité à **répéter** des sprints (RSa) s'est révélée être un indicateur clé de la performance en rugby à XV, et était corrélée aux indicateurs clés de différents profils d'activités en fonction des postes de jeu. Les résultats de la troisième étude soulignent l'importance de maintenir des capacités de production de force horizontale à grande vitesse et de puissance maximale pendant les séquences RHIE. La fatigue engendrée lors d'une séquence RHIE peut compromettre ces capacités, ce qui peut avoir un impact sur la performance en match. Ces résultats permettent d'identifier plusieurs implications pratiques :

- Suivi régulier : Mettre en place des protocoles d'évaluation de la RSA et de la RHIEa réguliers pour mesurer les progrès des joueurs dans ces facteurs clés de la performance.
- Optimisation de l'entraînement : Il est essentiel d'intégrer des stratégies d'entraînement visant à développer la capacité à répéter des efforts intenses chez les joueurs de rugby à XV. En particulier, l'entraînement en RSA permettrait d'améliorer l'activité des joueurs en match alors que le développement de la RHIEa conduirait à maintenir les performances maximales des efforts de différentes conditions de force et de vitesse.
- Développement des joueurs à long terme : Dans la mesure où nous savons que ces qualités physiques sont déterminantes dans la performance des joueurs de rugby professionnels. Ces informations sont à prendre en considération dans le plan de formation du joueur, pour prévoir un continuum qui amènera le jeune joueur à développer tous les déterminants nécessaires à un bon niveau de RSA et de RHIEa.

Du point de vue scientifique, cet axe de recherche ouvre de nouvelles perspectives. Pour de futures recherches, il pourrait être pertinent de réitérer l'étude 3 avec une distinction entre des athlètes « force dominant » et des athlètes « vitesse dominant » afin d'identifier dans quelles mesures l'altération des capacités d'application de force horizontale en sprint serait cohérente avec le profil FV initial de l'athlète. La quatrième et dernière étude montre que les méthodes d'entraînement en répétition de sprint (RSE) et en répétition d'effort de haute intensité (RHIE) sont toutes deux bénéfiques pour l'amélioration de la RHIEa et pour la capacité à produire des efforts de haute intensité en match. Nos résultats ont montré que ces entraînements engendraient des

améliorations spécifiques au programme suivi. Ainsi, nous identifions les implications pratiques de cette recherche :

- Choix de la méthode d'entraînement et individualisation : Les entraîneurs devraient choisir la méthode d'entraînement (RSE ou RHIE) en fonction des besoins particuliers des joueurs, de leur position et du style de jeu de l'équipe. L'entraînement en RSE peut être privilégié pour améliorer la performance sur les efforts requérant de la vitesse tels que les sprints et les accélérations, tandis que l'entraînement en RHIE semble plus approprié pour développer la performance dans les efforts résistés et dans les efforts de contact. L'entraînement RHIE s'est également montré plus intéressant pour améliorer la performance globale (indice combiné).
- Préparation physique intégrée : L'entraînement en RHIE permet de pratiquer une préparation physique intégrée, dans lequel le joueur est contraint à des sollicitations variées sur des efforts maximaux de différentes conditions de force et de vitesse. De plus, au-delà de l'amélioration de la qualité physique, l'intégration des efforts de contact pourrait permettre une amélioration technique des joueurs, qui pourraient participer à l'amélioration de la performance en match.

Du point de vue scientifique, la continuité de cet axe de recherche serait de s'intéresser à l'entraînement de la RHIEa et en particulier aux améliorations annexes qu'il pourrait engendrer. Nous pensons notamment aux autres qualités physiques comme la vitesse et la force, mais aussi aux compétences techniques dans les efforts de contact. Cette analyse permettrait d'élargir le champ de vision sur les adaptations physiologiques et techniques de l'entraînement de la RHIEa.

En conclusion, cette thèse a apporté des éclaircissements importants sur les liens entre la force horizontale, la capacité à répéter des efforts de haute intensité et la performance en match, mais aussi sur le développement de la capacité à répéter des efforts de haute intensité en match chez les joueurs de rugby à XV. Ces connaissances peuvent être précieuses pour améliorer la préparation physique et l'entraînement des joueurs, et offrent des perspectives essentielles pour maximiser la performance des joueurs de rugby à XV. En comprenant mieux les exigences physiologiques et biomécaniques du jeu, les staffs des équipes professionnelles peuvent élaborer des stratégies d'entraînement plus ciblées et efficaces visant à améliorer la performance en compétition. Cependant, il convient de noter que des recherches futures, avec des échantillons plus importants et une plus grande diversité de contextes, peuvent encore affiner notre compréhension de ces relations complexes.

BIBLIOGRAPHIE

Appleby, Brendyn, Robert U. Newton, et Prue Cormie. 2012. « Changes in Strength over a 2-Year Period in Professional Rugby Union Players ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 26 (9): 2538-46.

<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31823f8b86>.

Argus, Christos K., Nicholas D. Gill, et Justin W. L. Keogh. 2012. « Characterization of the Differences in Strength and Power Between Different Levels of Competition in Rugby Union Athletes ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 26 (10): 2698-2704. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318241382a>.

Aughey, Robert J. 2010. « Australian Football Player Work Rate: Evidence of Fatigue and Pacing? ». *International Journal of Sports Physiology and Performance* 5 (3): 394-405. <https://doi.org/10.1123/ijsp.5.3.394>.

Austin, Damien J., Tim J. Gabbett, et David G. Jenkins. 2013. « Reliability and Sensitivity of a Repeated High-Intensity Exercise Performance Test for Rugby League and Rugby Union ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 27 (4): 1128-35. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31825fe941>.

Austin, Damien, Tim Gabbett, et David Jenkins. 07/2011b. « Repeated High-Intensity Exercise in Professional Rugby Union ». *Journal of Sports Sciences* 29 (10): 1105-12. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.582508>.

Austin, Damien, Tim Gabbett, et David Jenkins. 5/2011a. « The Physical Demands of Super 14 Rugby Union ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 14 (3): 259-63. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2011.01.003>.

Balsom, P. D., J. Y. Seger, B. Sjödín, et B. Ekblom. 1992. « Physiological Responses to Maximal Intensity Intermittent Exercise ». *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 65 (2): 144-49. <https://doi.org/10.1007/BF00705072>.

Balsom, P., J. Seger, B. Sjödín, et B. Ekblom. 1992. « Maximal-Intensity Intermittent Exercise: Effect of Recovery Duration ». *International Journal of Sports Medicine* 13 (07): 528-33. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1021311>.

Beard, Adam, John Ashby, Ryan Chambers, Grégoire P. Millet, et Franck Brocherie. 2022. « Wales Anaerobic Test: Reliability and Fitness Profiles of International Rugby Union Players ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 36 (9): 2589-96. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003448>.

Beard, Adam, Ryan Chambers, Gregoire P. Millet, et Franck Brocherie. 2019. « Comparison of Game Movement Positional Profiles Between Professional Club and Senior International Rugby Union Players ». *International Journal of Sports Medicine* 40 (06): 385-89. <https://doi.org/10.1055/a-0858-9973>.

- Billat, L Véronique. 2001. « Interval Training for Performance: A Scientific and Empirical Practice ». *Sports Med*, 31 (2): 75-90.
- Billat, Véronique. 2012. *Physiologie et méthodologie de l'entraînement : de la théorie à la pratique*. Bruxelles: De Boeck.
- Billaut, François, et Kurt Smith. 2010. « Prolonged Repeated-Sprint Ability Is Related to Arterial O₂ Desaturation in Men ». *International Journal of Sports Physiology and Performance* 5 (2): 197-209. <https://doi.org/10.1123/ijsp.5.2.197>.
- Bishop, D, S Lawrence, et M Spencer. 2003a. « Predictors of Repeated-Sprint Ability in Elite Female Hockey Players ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 6 (2): 199-209. [https://doi.org/10.1016/S1440-2440\(03\)80255-4](https://doi.org/10.1016/S1440-2440(03)80255-4).
- Bishop, D, S Lawrence, et M Spencer. 2003b. « Predictors of Repeated-Sprint Ability in Elite Female Hockey Players ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 6 (2): 199-209. [https://doi.org/10.1016/S1440-2440\(03\)80255-4](https://doi.org/10.1016/S1440-2440(03)80255-4).
- Bishop, David, et Johann Edge. 2006. « Determinants of Repeated-Sprint Ability in Females Matched for Single-Sprint Performance ». *European Journal of Applied Physiology* 97 (4): 373-79. <https://doi.org/10.1007/s00421-006-0182-0>.
- Bishop, David, Johann Edge, Claire Thomas, et Jacques Mercier. 2008. « Effects of High-Intensity Training on Muscle Lactate Transporters and Postexercise Recovery of Muscle Lactate and Hydrogen Ions in Women ». *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 295 (6): R1991-98. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00863.2007>.
- Bishop, David, Johann Edge, et Carmel Goodman. 2004. « Muscle Buffer Capacity and Aerobic Fitness Are Associated with Repeated-Sprint Ability in Women ». *European Journal of Applied Physiology* 92 (4-5). <https://doi.org/10.1007/s00421-004-1150-1>.
- Bishop, David, Olivier Girard, et Alberto Mendez-Villanueva. 2011. « Repeated-Sprint Ability – Part II: Recommendations for Training ». *Sports Medicine* 41 (9): 741-56. <https://doi.org/10.2165/11590560-000000000-00000>.
- Black, Georgia M., et Tim J. Gabbett. 2015. « Repeated High-Intensity-Effort Activity in Elite and Semielite Rugby League Match Play ». *International Journal of Sports Physiology and Performance* 10 (6): 711-17. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0081>.
- Bogdanis, G. C., M. E. Nevill, L. H. Boobis, et H. K. Lakomy. 1996. « Contribution of Phosphocreatine and Aerobic Metabolism to Energy Supply during Repeated Sprint Exercise ». *Journal of Applied Physiology* 80 (3): 876-84. <https://doi.org/10.1152/jappl.1996.80.3.876>.
- Boyd, Luke J., Kevin Ball, et Robert J. Aughey. 2011. « The Reliability of MinimaxX Accelerometers for Measuring Physical Activity in Australian Football ». *International*

Journal of Sports Physiology and Performance 6 (3): 311-21.
<https://doi.org/10.1123/ijsp.6.3.311>.

Bravo, D., F. Impellizzeri, E. Rampinini, C. Castagna, D. Bishop, et U. Wisloff. 2008. « Sprint vs. Interval Training in Football ». *International Journal of Sports Medicine* 29 (08): 668-74.

Brazier, Jon, Mark Antrobus, Georgina K Stebbings, Stephen H Day, Peter Callus, Robert M Erskine, Mark A Bennett, Liam P Kilduff, et Alun G Williams. s. d. « The Anthropometric and Physiological Characteristics of Elite Male Rugby Athletes ».

Bredt, S. D. G. T., Chagas, M. H., Peixoto, G. H., Menzel, H. J., & de Andrade, A. G. P. 2020. « Understanding Player Load: Meanings and Limitations. » *Journal of human kinetics*, 71, 5–9. <https://doi.org/10.2478/hukin-2019-0072>

Brocherie, Franck, Olivier Girard, Raphaël Faiss, et Grégoire P. Millet. 2017. « Effects of Repeated-Sprint Training in Hypoxia on Sea-Level Performance: A Meta-Analysis ». *Sports Medicine* 47 (8): 1651-60. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0685-3>.

Buchheit, M. 2008. « 30-15 Intermittent Fitness Test et répétition de sprints ». *Science & Sports* 23 (1): 26-28. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2007.12.002>.

Buchheit, M. 2012. « Repeated-Sprint Performance in Team Sport Players: Associations with Measures of Aerobic Fitness, Metabolic Control and Locomotor Function ». *International Journal of Sports Medicine* 33 (03): 230-39. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1291364>.

Buchheit, Martin, Alberto Mendez-Villanueva, Gregory Delhomel, Matt Brughelli, et Said Ahmaidi. 2010. « Improving Repeated Sprint Ability in Young Elite Soccer Players: Repeated Shuttle Sprints Vs. Explosive Strength Training ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 24 (10): 2715-22. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181bf0223>.

Buchheit, Martin, Alberto Mendez-Villanueva, Marc Quod, Thomas Quesnel, et Said Ahmaidi. 2010. « Improving Acceleration and Repeated Sprint Ability in Well-Trained Adolescent Handball Players: Speed Versus Sprint Interval Training ». *International Journal of Sports Physiology and Performance* 5 (2): 152-64. <https://doi.org/10.1123/ijsp.5.2.152>.

Buchheit, Martin, et Paul B. Laursen. 2013a. « High-Intensity Interval Training, Solutions to the Programming Puzzle: Part I: Cardiopulmonary Emphasis ». *Sports Medicine* 43 (5): 313-38. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0029-x>.

Buchheit, Martin, et Paul B. Laursen. 2013b. « High-Intensity Interval Training, Solutions to the Programming Puzzle: Part II: Anaerobic Energy, Neuromuscular

Load and Practical Applications ». *Sports Medicine* 43 (10): 927-54.
<https://doi.org/10.1007/s40279-013-0066-5>.

Buchheit, Martin, Hani Al Haddad, Ben M. Simpson, Dino Palazzi, Pitre C. Bourdon, Valter Di Salvo, et Alberto Mendez-Villanueva. 2014. « Monitoring Accelerations With GPS in Football: Time to Slow Down? » *International Journal of Sports Physiology and Performance* 9 (3): 442-45. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0187>.

Cahill, Micheál J., Jon L. Oliver, John B. Cronin, Kenneth P. Clark, Matt R. Cross, et Rhodri S. Lloyd. 2019. « Sled-Pull Load–Velocity Profiling and Implications for Sprint Training Prescription in Young Male Athletes ». *Sports* 7 (5): 119.
<https://doi.org/10.3390/sports7050119>.

Cahill, Nicola, Kevin Lamb, Paul Worsfold, Roy Headey, et Stafford Murray. 2013. « The Movement Characteristics of English Premiership Rugby Union Players ». *Journal of Sports Sciences* 31 (3): 229-37.
<https://doi.org/10.1080/02640414.2012.727456>.

Cazorla, Georges, et Max Godemet. 2004. « Comment comprendre et organiser la preparation physique du rugbyman de haut niveau ? ». Document élaboré a la demande de la commission médicale de la ligue nationale de rugby.

Coghetto, Guilherme, Eduardo Manosso Zanrosso, Rodrigo Rabello, João Luiz Da Ros, et Rodrigo Rodrigues. 2023. « Association Between Success and Unsuccess Rates on Technical Skills and Physical Qualities in Rugby Players ». *Research Quarterly for Exercise and Sport* 94 (1): 254-62.
<https://doi.org/10.1080/02701367.2021.1967845>.

Comfort, Paul, Phillip Graham-Smith, Martyn J Matthews, et Chris Bamber. 2011. « Strength and Power Characteristics in English Elite Rugby League Players ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 25 (5): 1374-84.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181d687f5>.

Couderc, Anthony, Tim J. Gabbett, Julien Piscione, Julien Robineau, Alexis Peeters, Germain Igarza, Claire Thomas, Christine Hanon, et Mathieu Lacombe. 2019. « Repeated High-Intensity Effort Activity in International Male Rugby Sevens ». *Journal of Strength and Conditioning Research Publish Ahead of Print* (janvier).
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002986>.

Coughlan, Garrett F., Brian S. Green, Paul T. Pook, Eoin Toolan, et Sean P. O'Connor. 2011. « Physical Game Demands in Elite Rugby Union: A Global Positioning System Analysis and Possible Implications for Rehabilitation ». *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy* 41 (8): 600-605.
<https://doi.org/10.2519/jospt.2011.3508>.

Cousins, Ben E.W., John G. Morris, Caroline Sunderland, Anthony M. Bennett, Golnaz Shahtahmassebi, et Simon B. Cooper. 2022. « Training and Match Demands

of Elite Rugby Union ». *Journal of Strength and Conditioning Research* Publish Ahead of Print (février). <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004237>.

Crewther, Blair & Kilduff, Liam & Cook, Christian & Cunningham, Dan & Bunce, P & Bracken, Richard & Gaviglio, Chris. 2012. «Scaling strength and power for body mass differences in Rugby union players. » *The Journal of sports medicine and physical fitness*. 52. 27-32.

Crewther, Blair T, Tim Lowe, Robert P Weatherby, Nicholas Gill, et Justin Keogh. 2009. « Neuromuscular Performance of Elite Rugby Union Players and Relationships With Salivary Hormones ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 23 (7): 2046-53. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181b73c19>.

Cronin', John B, et Keir T Hansen. 2005. « STRENGTH AND POWER PREDICTORS OF SPORTS SPEED ». *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(2), 349-357

Cummins, Cloe, Rhonda Orr, Helen O'Connor, et Cameron West. 2013. « Global Positioning Systems (GPS) and Microtechnology Sensors in Team Sports: A Systematic Review ». *Sports Medicine* 43 (10): 1025-42. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0069-2>.

Cunniffe, Brian, Wayne Proctor, Julien S Baker, et Bruce Davies. 2009. « An Evaluation of the Physiological Demands of Elite Rugby Union Using Global Positioning System Tracking Software ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 23 (4): 1195-1203. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181a3928b>.

Cunningham, Dan & West, Daniel & Owen, Nick & Shearer, David & Finn, Charlie & Bracken, Richard & Crewther, Blair & Scott, Phil & Cook, Christian & Kilduff, Liam. 2013. «Strength and power predictors of sprinting performance in professional rugby players. » *The Journal of sports medicine and physical fitness*. 53. 105-11.

Cunningham, Daniel J., David A. Shearer, Neil Carter, Scott Drawer, Ben Pollard, Mark Bennett, Robin Eager, et al. 2018. « Assessing Worst Case Scenarios in Movement Demands Derived from Global Positioning Systems during International Rugby Union Matches: Rolling Averages versus Fixed Length Epochs ». Édité par Caroline Sunderland. *PLOS ONE* 13 (4): e0195197. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195197>.

Cunningham, Daniel J., David A. Shearer, Scott Drawer, Ben Pollard, Christian J. Cook, Mark Bennett, Mark Russell, et Liam P. Kilduff. 2018. « Relationships between Physical Qualities and Key Performance Indicators during Match-Play in Senior International Rugby Union Players ». Édité par Slavko Rogan. *PLOS ONE* 13 (9): e0202811. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202811>.

Cunningham, Daniel J., David A. Shearer, Scott Drawer, Ben Pollard, Robin Eager, Neil Taylor, Christian J. Cook, et Liam P. Kilduff. 2016. « Movement Demands of Elite

Under-20s and Senior International Rugby Union Players ». Édité par Karen Hind. PLOS ONE 11 (11): e0164990. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164990>.

Cunningham, Daniel, David A. Shearer, Scott Drawer, Robin Eager, Neil Taylor, Christian Cook, et Liam P. Kilduff. 2016a. « Movement Demands of Elite U20 International Rugby Union Players ». Édité par Øyvind Sandbakk. PLOS ONE 11 (4): e0153275. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153275>.

Cunningham, Daniel, David A. Shearer, Scott Drawer, Robin Eager, Neil Taylor, Christian Cook, et Liam P. Kilduff. 2016b. « Movement Demands of Elite U20 International Rugby Union Players ». Édité par Øyvind Sandbakk. PLOS ONE 11 (4): e0153275. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153275>.

Darrall-Jones, Joshua D., Ben Jones, et Kevin Till. 2016. « Anthropometric, Sprint, and High-Intensity Running Profiles of English Academy Rugby Union Players by Position ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 30 (5): 1348-58. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001234>.

Dawson, B., C. Goodman, S. Lawrence, D. Preen, T. Polglaze, M. Fitzsimons, et P. Fournier. 1997. « Muscle Phosphocreatine Repletion Following Single and Repeated Short Sprint Efforts ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 7 (4): 206-13. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.1997.tb00141.x>.

Delecluse, Christophe. 1997. « Influence of Strength Training on Sprint Running Performance: Current Findings and Implications for Training ». *Sports Medicine* 24 (3): 147-56. <https://doi.org/10.2165/00007256-199724030-00001>.

den Hollander S, Brown J, Lambert M, Treu P, Hendricks S. 2016. «Skills Associated with Line Breaks in Elite Rugby Union. » *J Sports Sci Med*. 2016 Aug 5;15(3):501-508. PMID: 27803629; PMCID: PMC4974863.

Deutsch, M. U., G. A. Kearney, et N. J. Rehrer. 2007. « Time – Motion Analysis of Professional Rugby Union Players during Match-Play ». *Journal of Sports Sciences* 25 (4): 461-72. <https://doi.org/10.1080/02640410600631298>.

Deutsch, M.U., G. J. Maw, D. Jenkins, et P. Reaburn. 1998. « Heart Rate, Blood Lactate and Kinematic Data of Elite Colts (under-19) Rugby Union Players during Competition ». *Journal of Sports Sciences* 16 (6): 561-70. <https://doi.org/10.1080/026404198366524>.

Dubois, Romain, Noëlle Bru, Thierry Paillard, Anne Le Cunuder, Mark Lyons, Olivier Maurelli, Kilian Philippe, et Jacques Prioux. 2020. « Rugby Game Performances and Weekly Workload: Using of Data Mining Process to Enter in the Complexity ». Édité par Cristina Cortis. PLOS ONE 15 (1): e0228107. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228107>.

Dupont, Grégory, Grégoire P. Millet, Comlavi Guinhouya, et Serge Berthoin. 2005. « Relationship between Oxygen Uptake Kinetics and Performance in Repeated Running Sprints ». *European Journal of Applied Physiology* 95 (1): 27-34. <https://doi.org/10.1007/s00421-005-1382-8>.

Duthie, Grant M, David B Pyne, Damian J Marsh, et Sue L Hooper. 2006. « SPRINT PATTERNS IN RUGBY UNION PLAYERS DURING COMPETITION ». *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(1), 208–214.

Duthie, Grant, David Pyne, et Sue Hooper. 2003. « Applied Physiology and Game Analysis of Rugby Union »: *Sports Medicine* 33 (13): 973-91. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333130-00003>.

Duthie, Grant, David Pyne, et Sue Hooper. 2005. « Time Motion Analysis of 2001 and 2002 Super 12 Rugby ». *Journal of Sports Sciences* 23 (5): 523-30. <https://doi.org/10.1080/02640410410001730188>.

Edge, Johann, David Bishop, Carmel Goodman, et Brian Dawson. 2005. « Effects of High- and Moderate-Intensity Training on Metabolism and Repeated Sprints ». *Medicine & Science in Sports & Exercise* 37 (11): 1975-82. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000175855.35403.4c>.

Edge, Johann, David Bishop, et Carmel Goodman. 2006. « Effects of Chronic NaHCO₃ Ingestion during Interval Training on Changes to Muscle Buffer Capacity, Metabolism, and Short-Term Endurance Performance ». *Journal of Applied Physiology* 101 (3): 918-25. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01534.2005>.

Edge, Johann, Stephen Hill-Haas, Carmel Goodman, et David Bishop. 2006. « Effects of Resistance Training on H⁺ Regulation, Buffer Capacity, and Repeated Sprints »: *Medicine & Science in Sports & Exercise* 38 (11): 2004-11. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000233793.31659.a3>.

Fornasier-Santos, Charly, Grégoire P Millet, Paul Stridgeon, Olivier Girard, Franck Brocherie, et Stéphane Nottin. 2020. « High-Intensity Activity in European vs. National Rugby Union Games in the Best 2014–2015 Team ». *International Journal of Sports Medicine*, novembre, a-1144-3035. <https://doi.org/10.1055/a-1144-3035>.

Fornasier-Santos, Charly, Grégoire P. Millet, et Xavier Woorons. 2018. « Repeated-Sprint Training in Hypoxia Induced by Voluntary Hypoventilation Improves Running Repeated-Sprint Ability in Rugby Players ». *European Journal of Sport Science* 18 (4): 504-12. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1431312>.

Fornasier-Santos, Charly, Grégoire P. Millet, Paul Stridgeon, Franck Brocherie, Olivier Girard, et Stéphane Nottin. 2021. « How Does Playing Position Affect Fatigue-Induced Changes in High-Intensity Locomotor and Micro-Movements Patterns during Professional Rugby Union Games? » *European Journal of Sport Science* 21 (10): 1364-74. <https://doi.org/10.1080/17461391.2020.1829715>.

- Gabbett, Tim J, David G Jenkins, et Bruce Abernethy. 2011. « Correlates of Tackling Ability in High-Performance Rugby League Players ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 25 (1): 72-79. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181ff506f>.
- Gabbett, Tim J. 12/2015a. « Relationship Between Accelerometer Load, Collisions, and Repeated High-Intensity Effort Activity in Rugby League Players »: *Journal of Strength and Conditioning Research* 29 (12): 3424-31. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001017>.
- Gabbett, Tim J. 12/2015b. « Use of Relative Speed Zones Increases the High-Speed Running Performed in Team Sport Match Play ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 29 (12): 3353-59. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001016>.
- Gabbett, Tim J. 2012. « Sprinting Patterns of National Rugby League Competition ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 26 (1): 121-30. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31821e4c60>.
- Gabbett, Tim J. 2013. « Influence of the Opposing Team on the Physical Demands of Elite Rugby League Match Play »: *Journal of Strength and Conditioning Research* 27 (6): 1629-35. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318274f30e>.
- Gabbett, Tim J. 2015. « Relationship Between Accelerometer Load, Collisions, and Repeated High-Intensity Effort Activity in Rugby League Players ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 29 (12): 3424-31. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001017>.
- Gabbett, Tim J. 2016. « Influence of Fatigue on Tackling Ability in Rugby League Players: Role of Muscular Strength, Endurance, and Aerobic Qualities ». Édité par Jaime Sampaio. *PLOS ONE* 11 (10): e0163161. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163161>.
- Gabbett, Tim J., David G. Jenkins, et Bruce Abernethy. 10/2011b. « Relative Importance of Physiological, Anthropometric, and Skill Qualities to Team Selection in Professional Rugby League ». *Journal of Sports Sciences* 29 (13): 1453-61. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.603348>.
- Gabbett, Tim J., et Aaron J. Wheeler. 2015. « Predictors of Repeated High-Intensity-Effort Ability in Rugby League Players ». *International Journal of Sports Physiology and Performance* 10 (6): 718-24. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0127>.
- Gabbett, Tim J., Josh G. Stein, Justin G. Kemp, et Christian Lorenzen. 2013. « Relationship Between Tests of Physical Qualities and Physical Match Performance in Elite Rugby League Players »: *Journal of Strength and Conditioning Research* 27 (6): 1539-45. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318274f236>.

Gabbett, Tim, Jason Kelly, et Troy Pezet. 2007. « RELATIONSHIP BETWEEN PHYSICAL FITNESS AND PLAYING ABILITY IN RUGBY LEAGUE PLAYERS ». *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(4), 1126–1133.

Girard, Olivier, Alberto Mendez-Villanueva, et David Bishop. 2011. « Repeated-Sprint Ability – Part I: Factors Contributing to Fatigue ». *Sports Medicine* 41 (8): 673-94. <https://doi.org/10.2165/11590550-000000000-00000>.

Glaister, Mark. 2005. « Multiple Sprint Work: Physiological Responses, Mechanisms of Fatigue and the Influence of Aerobic Fitness ». *Sports Medicine* 35 (9): 757-77. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535090-00003>.

Hartwig, Timothy & Naughton, Geraldine & Searl, John. 2011. «Motion Analyses of Adolescent Rugby Union Players: A Comparison of Training and Game Demands. » *Journal of strength and conditioning research / National Strength & Conditioning Association*. 25. 966-72. 10.1519/JSC.0b013e3181d09e24.

Hendricks, Sharief, Tiffany van Niekerk, Drew Wade Sin, Mike Lambert, Steve den Hollander, James Brown, Willie Maree, Paul Treu, Kevin Till, et Ben Jones. 2018. « Technical Determinants of Tackle and Ruck Performance in International Rugby Union ». *Journal of Sports Sciences* 36 (5): 522-28. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1322216>.

Higham, Dean G., David B. Pyne, Judith M. Anson, et Anthony Eddy. 2012. « Movement Patterns in Rugby Sevens: Effects of Tournament Level, Fatigue and Substitute Players ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 15 (3): 277-82. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2011.11.256>.

Hill. 1938. « The Heat of Shortening and the Dynamic Constants of Muscle ».

Hughes, Mike, Michael David Hughes, Jason Williams, Nic James, Goran Vuckovic, et Duncan Locke. 2012. « Performance Indicators in Rugby Union ». *Journal of Human Sport and Exercise* 7 (2): 383-401. <https://doi.org/10.4100/jhse.2012.72.05>.

Hulin, Billy T., Tim J. Gabbett, Rich D. Johnston, et David G. Jenkins. 2017. « Wearable Microtechnology Can Accurately Identify Collision Events during Professional Rugby League Match-Play ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 20 (7): 638-42. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2016.11.006>.

Hulin, Billy T., Tim J. Gabbett, Simon Kearney, et Alex Corvo. 2015. « Physical Demands of Match Play in Successful and Less-Successful Elite Rugby League Teams ». *International Journal of Sports Physiology and Performance* 10 (6): 703-10. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0080>.

International Rugby Board. 2023. « <https://www.world.rugby/the-game/laws/law/1/?highlight=dimensions%20terrain> ».

Jiménez-Reyes, Pedro, Matt Cross, Alex Ross, Pierre Samozino, Matt Brughelli, Nicholas Gill, et Jean-Benoît Morin. 2019. « Changes in Mechanical Properties of Sprinting during Repeated Sprint in Elite Rugby Sevens Athletes ». *European Journal of Sport Science* 19 (5): 585-94. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1542032>.

Johnston, Rich D, et Tim J Gabbett. 2011. « Repeated-Sprint and Effort Ability in Rugby League Players ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 25 (10): 2789-95. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31820f5023>.

Johnston, Rich D., Tim J. Gabbett, David G. Jenkins, et Billy T. Hulin. 2015. « Influence of Physical Qualities on Post-Match Fatigue in Rugby League Players ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 18 (2): 209-13. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2014.01.009>.

Johnston, Rich D., Tim J. Gabbett, David G. Jenkins, et Michael J. Speranza. 2016. « Effect of Different Repeated-High-Intensity-Effort Bouts on Subsequent Running, Skill Performance, and Neuromuscular Function ». *International Journal of Sports Physiology and Performance* 11 (3): 311-18. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0243>.

Johnston, Rich D., Tim J. Gabbett, et David G. Jenkins. 2015. « Influence of Number of Contact Efforts on Running Performance During Game-Based Activities ». *International Journal of Sports Physiology and Performance* 10 (6): 740-45. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0110>.

Johnston, Rich D., Tim J. Gabbett, Shane Walker, Ben Walker, et David G. Jenkins. 2015. « Are Three Contact Efforts Really Reflective of a Repeated High-Intensity Effort Bout? » *Journal of Strength and Conditioning Research* 29 (3): 816-21. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000679>.

Johnston, Richard J., Mark L. Watsford, Stephen J. Kelly, Matthew J. Pine, et Robert W. Spurr. 2014. « Validity and Interunit Reliability of 10 Hz and 15 Hz GPS Units for Assessing Athlete Movement Demands ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 28 (6): 1649-55. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000323>.

Jones, Marc R., Daniel J. West, Blair T. Crewther, Christian J. Cook, et Liam P. Kilduff. 2015. « Quantifying Positional and Temporal Movement Patterns in Professional Rugby Union Using Global Positioning System ». *European Journal of Sport Science* 15 (6): 488-96. <https://doi.org/10.1080/17461391.2015.1010106>.

Jones, Nicholas M.P., Stephen D. Mellalieu, et Nic James. 2004. « Team Performance Indicators as a Function of Winning and Losing in Rugby Union. » *International Journal of Performance Analysis in Sport* 4 (1): 61-71. <https://doi.org/10.1080/24748668.2004.11868292>.

Jones, Thomas W., Andrew Smith, Lindsay S. Macnaughton, et Duncan N. French. 2016. « Strength and Conditioning and Concurrent Training Practices in Elite Rugby

Union ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 30 (12): 3354-66.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001445>.

Juel, C., H. Pilegaard, J. J. Nielsen, et J. Bangsbo. 2000. « Interstitial K⁺ in Human Skeletal Muscle during and after Dynamic Graded Exercise Determined by Microdialysis ». *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 278 (2): R400-406.
<https://doi.org/10.1152/ajpregu.2000.278.2.R400>.

Lacey, James de, Matt E. Brughelli, Michael R. McGuigan, et Keir T. Hansen. 2014. « Strength, Speed and Power Characteristics of Elite Rugby League Players ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 28 (8): 2372-75.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000397>.

Lacome, Mathieu, Julien Piscione, Jean-Philippe Hager, et Muriel Bourdin. 2014. « A New Approach to Quantifying Physical Demand in Rugby Union ». *Journal of Sports Sciences* 32 (3): 290-300. <https://doi.org/10.1080/02640414.2013.823225>.

Lacome, Mathieu. 2013. « Analyse de la tâche et physiologie appliquée au rugby : Etude de la fatigue associée à l'exercice maximal isométrique répété », 135.

Lahti, Johan, Pedro Jiménez-Reyes, Matt R. Cross, Pierre Samozino, Patrick Chassaing, Benjamin Simond-Cote, Juha P. Ahtiainen, et Jean-Benoit Morin. 2020. « Individual Sprint Force-Velocity Profile Adaptations to In-Season Assisted and Resisted Velocity-Based Training in Professional Rugby ». *Sports* 8 (5): 74.
<https://doi.org/10.3390/sports8050074>.

Lahti, Johan, Toni Huuhka, Valentin Romero, Ian Bezodis, Jean-Benoit Morin, et Keijo Häkkinen. 2020. « Changes in Sprint Performance and Sagittal Plane Kinematics after Heavy Resisted Sprint Training in Professional Soccer Players ». *PeerJ* 8 (décembre): e10507. <https://doi.org/10.7717/peerj.10507>.

Larsson, Peter. 2003. « Global Positioning System and Sport-Specific Testing ». *Sports Medicine* 33 (15): 1093-1101. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333150-00002>.

Marqués-Jiménez, Diego, Julio Calleja-González, Iñaki Arratibel-Imaz, et Nicolás Terrados. 2022. « Match Loads May Predict Neuromuscular Fatigue and Intermittent-Running Endurance Capacity Decrement after a Soccer Match ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19 (22): 15390.
<https://doi.org/10.3390/ijerph192215390>.

Martínez-Cava, Alejandro, Alejandro Hernández-Belmonte, Javier Courel-Ibáñez, Ricardo Morán-Navarro, Juan José González-Badillo, et Jesús G. Pallarés. 2020. « Reliability of Technologies to Measure the Barbell Velocity: Implications for Monitoring Resistance Training ». Édité par Daniel Boulosa. *PLOS ONE* 15 (6): e0232465. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232465>.

- McMahon, Shaun, et David Jenkins. 2002. « Factors Affecting the Rate of Phosphocreatine Resynthesis Following Intense Exercise »: *Sports Medicine* 32 (12): 761-84. <https://doi.org/10.2165/00007256-200232120-00002>.
- McMaster, Daniel T., Nicholas D. Gill, John B. Cronin, et Michael R. McGuigan. 2016. « Force-Velocity-Power Assessment in Semiprofessional Rugby Union Players ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 30 (4): 1118-26. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182a1da46>.
- Mendez-Villanueva, Alberto, Peter Hamer, et David Bishop. 2008. « Fatigue in Repeated-Sprint Exercise Is Related to Muscle Power Factors and Reduced Neuromuscular Activity ». *European Journal of Applied Physiology* 103 (4): 411-19. <https://doi.org/10.1007/s00421-008-0723-9>.
- Morel, Baptiste, David M. Rouffet, David J. Bishop, Samuel J. Rota, et Christophe A. Hautier. 2015. « Fatigue Induced by Repeated Maximal Efforts Is Specific to the Rugby Task Performed ». *International Journal of Sports Science & Coaching* 10 (1): 11-20. <https://doi.org/10.1260/1747-9541.10.1.11>.
- Morin, Jean-Benoît, et Pierre Samozino. 2016a. « Interpreting Power-Force-Velocity Profiles for Individualized and Specific Training ». *International Journal of Sports Physiology and Performance*. DOI: 10.1123/ijsp.2015-0638
- Morin, Jean-Benoît, et Pierre Samozino. 2016b. « Interpreting Power-Force-Velocity Profiles for Individualized and Specific Training ». *International Journal of Sports Physiology and Performance* 11 (2): 267-72. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0638>.
- Morin, Jean-Benoît, Muriel Bourdin, Pascal Edouard, Nicolas Peyrot, Pierre Samozino, et Jean-René Lacour. 2012. « Mechanical Determinants of 100-m Sprint Running Performance ». *European Journal of Applied Physiology* 112 (11): 3921-30. <https://doi.org/10.1007/s00421-012-2379-8>.
- Morin, Jean-Benoît, Pascal Edouard, et Pierre Samozino. 2011. « Technical Ability of Force Application as a Determinant Factor of Sprint Performance ». *Medicine & Science in Sports & Exercise* 43 (9): 1680-88. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318216ea37>.
- Morin, Jean-Benoit, Pierre Samozino, Munenori Murata, Matt R Cross, et Ryu Nagahara. 2019. « A Simple Method for Computing Sprint Acceleration Kinetics from Running Velocity Data: Replication Study with Improved Design ». *Journal of Biomechanics* 94 (septembre): 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.07.020>.
- Natera, Alex O.W., Jacob Jennings, Aiden J. Oakley, et Thomas W. Jones. 2019. « Influence of Environmental Conditions on Performance and Heart Rate Responses to the 30-15 Incremental Fitness Test in Rugby Union Athletes ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 33 (2): 486-91. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001865>.

Pollard, Benjamin T., Anthony N. Turner, Robin Eager, Daniel J. Cunningham, Christian J. Cook, Patrick Hogben, et Liam P. Kilduff. 2018. « The Ball in Play Demands of International Rugby Union ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 21 (10): 1090-94. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2018.02.015>.

Posthumus, Logan, Campbell Macgregor, Paul Winwood, Katrina Darry, Matthew Driller, et Nicholas Gill. 2020. « Physical and Fitness Characteristics of Elite Professional Rugby Union Players ». *Sports* 8 (6): 85. <https://doi.org/10.3390/sports8060085>.

Quarrie, Kenneth L., et Will G. Hopkins. 2007. « Changes in Player Characteristics and Match Activities in Bledisloe Cup Rugby Union from 1972 to 2004 ». *Journal of Sports Sciences* 25 (8): 895-903. <https://doi.org/10.1080/02640410600944659>.

Quarrie, Kenneth L., Will G. Hopkins, Mike J. Anthony, et Nicholas D. Gill. 2013. « Positional Demands of International Rugby Union: Evaluation of Player Actions and Movements ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 16 (4): 353-59. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2012.08.005>.

Rabita, G., S. Dorel, J. Slawinski, E. Sàez-de-Villarreal, A. Couturier, P. Samozino, et J-B. Morin. 2015. « Sprint Mechanics in World-Class Athletes: A New Insight into the Limits of Human Locomotion: Sprint Mechanics in Elite Athletes ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 25 (5): 583-94. <https://doi.org/10.1111/sms.12389>.

Ramsbottom, R., Brewer, J., & Williams, C. 1988. «A progressive shuttle run test to estimate maximal oxygen uptake. » *British journal of sports medicine*, 22(4), 141–144. <https://doi.org/10.1136/bjism.22.4.141>

Read, Dale B., Ben Jones, Padraic J. Phibbs, Gregory A. B. Roe, Joshua Darrall-Jones, Jonathon J. S. Weakley, et Kevin Till. 2018. « The Physical Characteristics of Match-Play in English Schoolboy and Academy Rugby Union ». *Journal of Sports Sciences* 36 (6): 645-50. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1329546>.

Reardon, Cillian, Daniel P Tobin, Peter Tierney, et Eamonn Delahun. 2017b-10-18. « Collision Count in Rugby Union: A Comparison of Micro-Technology and Video Analysis Methods ». *Journal of Sports Sciences* 35 (20): 2028-34. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1252051>.

Reardon, Cillian, Daniel P. Tobin, Peter Tierney, et Eamonn Delahun. 2017a-5-16. « The Worst Case Scenario: Locomotor and Collision Demands of the Longest Periods of Gameplay in Professional Rugby Union ». Édité par Brion Maher. *PLOS ONE* 12 (5): e0177072. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177072>.

Roberts, Simon P., Grant Trewartha, Rob J. Higgitt, Joe El-Abd, et Keith A. Stokes. 2008. « The Physical Demands of Elite English Rugby Union ». *Journal of Sports Sciences* 26 (8): 825-33. <https://doi.org/10.1080/02640410801942122>.

Roe, G and Till, K and Beggs, CB and Jones, B. 2016. «The Use of Accelerometers to Quantify Collisions and Running Demands of Rugby Union Match-Play. » International Journal of Performance Analysis in Sport, 16 (2). pp. 590-601. ISSN 1474-8185

Ross, Alex. 2015. « Physical Characteristics and Match Performance in Rugby Sevens ».

Rossignol, Peter Le, Tim J. Gabbett, Dan Comerford, et Warren R. Stanton. 2014. « Repeated-Sprint Ability and Team Selection in Australian Football League Players ». International Journal of Sports Physiology and Performance 9 (1): 161-65. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0005>.

Samozino, P., G. Rabita, S. Dorel, J. Slawinski, N. Peyrot, E. Saez de Villarreal, et J.-B. Morin. 2016. « A Simple Method for Measuring Power, Force, Velocity Properties, and Mechanical Effectiveness in Sprint Running: Simple Method to Compute Sprint Mechanics ». Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports 26 (6): 648-58. <https://doi.org/10.1111/sms.12490>.

Samozino, Pierre, Nicolas Peyrot, Pascal Edouard, Ryu Nagahara, Pedro Jimenez-Reyes, Benedicte Vanwanseele, et Jean-Benoit Morin. 2022. « Optimal Mechanical Force-velocity Profile for Sprint Acceleration Performance ». Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports 32 (3): 559-75. <https://doi.org/10.1111/sms.14097>.

Scott, Adam C, Nigel Roe, Andrew J.S Coats, et Massimo F Piepoli. 2003. « Aerobic Exercise Physiology in a Professional Rugby Union Team ». International Journal of Cardiology 87 (2-3): 173-77. [https://doi.org/10.1016/S0167-5273\(02\)00211-5](https://doi.org/10.1016/S0167-5273(02)00211-5).

Sedeaud, A, H Vidalin, M Tafflet, et A Marc. 2013. « Rugby Morphologies: “Bigger and Taller”, Reflects an Early Directional Selection ». THE JOURNAL OF SPORTS MEDICINE AND PHYSICAL FITNESS 53 (2).

Seitz, Laurent B., Alvaro Reyes, Tai T. Tran, Eduardo Saez de Villarreal, et G. Gregory Haff. 2014. « Increases in Lower-Body Strength Transfer Positively to Sprint Performance: A Systematic Review with Meta-Analysis ». Sports Medicine 44 (12): 1693-1702. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0227-1>.

Sheehan, Adam, Shane Malone, Aled Walters, Tim Gabbett, et Kieran Collins. 2022. « Match-Play Profile of Elite Rugby Union, with Special Reference to Repeated High-Intensity Effort Activity (RHIE) ». Sport Sciences for Health 18 (3): 947-56. <https://doi.org/10.1007/s11332-021-00879-9>.

Smart, Daniel J., Will G. Hopkins, et Nicholas D. Gill. 2013. « Differences and Changes in the Physical Characteristics of Professional and Amateur Rugby Union Players ». Journal of Strength and Conditioning Research 27 (11): 3033-44. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31828c26d3>.

Smart, Daniel, Will G. Hopkins, Kenneth L. Quarrie, et Nicholas Gill. 2014. « The Relationship between Physical Fitness and Game Behaviours in Rugby Union Players ». *European Journal of Sport Science* 14 (sup1): S8-17. <https://doi.org/10.1080/17461391.2011.635812>.

Spencer, Matt, David Bishop, Brian Dawson, Carmel Goodman, et Rob Duffield. 2006. « Metabolism and Performance in Repeated Cycle Sprints: Active versus Passive Recovery ». *Medicine & Science in Sports & Exercise* 38 (8): 1492-99. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000228944.62776.a7>.

Spencer, Matt, David Bishop, Brian Dawson, et Carmel Goodman. 2005. « Physiological and Metabolic Responses of Repeated-Sprint Activities: Specific to Field-Based Team Sports ». *Sports Medicine* 35 (12): 1025-44. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535120-00003>.

Spencer, Matt, Steven Lawrence, Claire Rechichi, David Bishop, Brian Dawson, et Carmel Goodman. 2004. « Time–Motion Analysis of Elite Field Hockey, with Special Reference to Repeated-Sprint Activity ». *Journal of Sports Sciences* 22 (9): 843-50. <https://doi.org/10.1080/02640410410001716715>.

Stoop, Rahel & Hohenauer, Erich & Rucker, Alfred & Clijsen, Ron. 2018. « Anthropometric properties versus physical performance in rugby union forwards and backs - A systematic review. ». *Annals of Applied Sport Science*. 6. 1-13. [10.29252/aassjournal.6.2.1](https://doi.org/10.29252/aassjournal.6.2.1).

Suárez-Arrones, Luis J., L. Javier Portillo, José M. González-Ravé, Victor E. Muñoz, et Francisco Sanchez. 2012. « Match Running Performance in Spanish Elite Male Rugby Union Using Global Positioning System ». *Isokinetics and Exercise Science* 20 (2): 77-83. <https://doi.org/10.3233/IES-2012-0444>.

Swaby, Rick, Paul A. Jones, et Paul Comfort. 2016. « Relationship Between Maximum Aerobic Speed Performance and Distance Covered in Rugby Union Games ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 30 (10): 2788-93. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001375>.

Takamori, Sohei, Michael J. Hamlin, David C. Kieser, Doug King, Patria Hume, Tetsuya Yamazaki, Masashi Hachiya, et Peter D. Olsen. 2022. « Senior Club-Level Rugby Union Player's Positional Movement Performance Using Individualized Velocity Thresholds and Accelerometer-Derived Impacts in Matches ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 36 (3): 710-16. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003523>.

Tee, Jason C., Yoga Coopoo, et Mike Lambert. 2020. « Pacing Characteristics of Whole and Part-Game Players in Professional Rugby Union ». *European Journal of Sport Science* 20 (6): 722-33. <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1660410>.

Tessier, Jean-François, Fabien-A Basset, Martin Simoneau, et Normand Teasdale. 2013. « Lower-Limb Power Cannot Be Estimated Accurately from Vertical Jump Tests ». *Journal of Human Kinetics* 38 (septembre): 5-13. <https://doi.org/10.2478/hukin-2013-0040>.

Thomas, C., S. Perrey, K. Lambert, G. Hugon, D. Mornet, et J. Mercier. 2005. « Monocarboxylate Transporters, Blood Lactate Removal after Supramaximal Exercise, and Fatigue Indexes in Humans ». *Journal of Applied Physiology* 98 (3): 804-9. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01057.2004>.

Trincat, Laurent, Xavier Woorons, et Grégoire P. Millet. 2017. « Repeated-Sprint Training in Hypoxia Induced by Voluntary Hypoventilation in Swimming ». *International Journal of Sports Physiology and Performance* 12 (3): 329-35. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0674>.

Ungureanu, Alexandru N., Paolo Riccardo Brustio, et Corrado Lupo. 2021. « Technical and Tactical Effectiveness Is Related to Time-Motion Performance in Elite Rugby ». *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 61 (2). <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.20.10998-8>.

Vachon, Adrien, Nicolas Berryman, Iñigo Mujika, Jean-Baptiste Paquet, et Laurent Bosquet. 2021. « Fitness Determinants of Repeated High-Intensity Effort Ability in Elite Rugby Union Players ». *International Journal of Sports Physiology and Performance* 16 (8): 1103-10. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0525>.

Vachon, Adrien, Nicolas Berryman, Iñigo Mujika, Jean-Baptiste Paquet, et Laurent Bosquet. 2022. « Preconditioning Activities to Enhance Repeated High-Intensity Efforts in Elite Rugby Union Players ». *International Journal of Sports Physiology and Performance* 17 (6): 871-78. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0270>.

Vachon, Adrien, Nicolas Berryman, Iñigo Mujika, Jean-Baptiste Paquet, Tony Monnet, et Laurent Bosquet. 2020. « Reliability of a Repeated High-Intensity Effort Test for Elite Rugby Union Players ». *Sports* 8 (5): 72. <https://doi.org/10.3390/sports8050072>.

Varley, Matthew C., Ian H. Fairweather, et Robert J. Aughey. 2012. « Validity and Reliability of GPS for Measuring Instantaneous Velocity during Acceleration, Deceleration, and Constant Motion ». *Journal of Sports Sciences* 30 (2): 121-27. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.627941>.

Venter, Re, E Opperman, et S Opperman. 2011. « The Use of Global Positioning System (GPS) Tracking Devices to Assess Movement Demands and Impacts in Under-19 Rugby Union Match Play ». *African Journal for Physical, Health Education, Recreation and Dance* 17 (1). <https://doi.org/10.4314/ajpherd.v17i1.65242>.

Wang, Ran, Jay R. Hoffman, Satoru Tanigawa, Amelia A. Miramonti, Michael B. La Monica, Kyle S. Beyer, David D. Church, David H. Fukuda, et Jeffrey R. Stout. 2016.

« Isometric Mid-Thigh Pull Correlates With Strength, Sprint, and Agility Performance in Collegiate Rugby Union Players ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 30 (11): 3051-56. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001416>.

Watkins, Casey M., Adam Storey, Michael R. McGuigan, Paul Downes, et Nicholas D. Gill. 2021. « Horizontal Force-Velocity-Power Profiling of Rugby Players: A Cross-Sectional Analysis of Competition-Level and Position-Specific Movement Demands ». *Journal of Strength and Conditioning Research* Publish Ahead of Print (avril). <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004027>.

Weber, E.F. 1846. *Muskelbewegung*. *Handwörterbuch Der Physiologie*.

Williams, Jason, Mike Hughes, et Peter O'Donoghue. 2005. « The Effect of Rule Changes on Match and Ball in Play Time in Rugby Union. » *International Journal of Performance Analysis in Sport* 5 (3): 1-11. .