



HAL
open science

Quel environnement optimal pour le développement physique à long terme du jeune joueur de rugby Elite ? : Etude des caractéristiques physiques et des exigences en compétitions

Alexis Peeters

► To cite this version:

Alexis Peeters. Quel environnement optimal pour le développement physique à long terme du jeune joueur de rugby Elite ? : Etude des caractéristiques physiques et des exigences en compétitions. Education. Université Bourgogne Franche-Comté, 2023. Français. NNT : 2023UBFCK012 . tel-04116896

HAL Id: tel-04116896

<https://theses.hal.science/tel-04116896>

Submitted on 5 Jun 2023

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.



**THÈSE DE DOCTORAT DE L'ÉTABLISSEMENT UNIVERSITÉ BOURGOGNE
FRANCHE-COMTÉ**

**PRÉPARÉE Au Laboratoire INSERM U1093 Cognition, Action, et Plasticité
Sensorimotrice et à la Fédération Française de Rugby**

École doctorale n°554

Environnements - Santé

En vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences du Sport

Par

Alexis PEETERS

**Quel environnement optimal pour le développement physique à
long terme du jeune joueur de rugby Élite ?**

Étude des caractéristiques physiques et des exigences en compétitions.

Thèse présentée et soutenue au Centre National de Rugby, à Marcoussis, le 06/02/2023.

Composition du Jury :

Pr. Claire Tourny
Pr. Laurent Bosquet
Dr. Frédéric Daussin
Pr. Jacques Prioux
Pr. Nicolas Babault
Dr. Christopher Carling
Dr. Julien Piscione

Université de Rouen
Université de Poitiers
Université de Lille
École Normale Supérieure de Rennes
Université de Bourgogne Franche-Comté
Fédération Française de Football
Fédération Française de Rugby

Rapporteur
Rapporteur
Examinateur
Examinateur
Directeur de thèse
Codirecteur de thèse
Invité

Remerciements

Voilà c'est fini, je parle évidemment de la rédaction de ce manuscrit, mais surtout des longues journées, soirées et nuits à travailler sur cette thèse. Le moment pour moi de prendre un peu de recul sur ces dernières années et de constater que ce travail n'aurait pas été possible seul, sans l'aide et le soutien d'un grand nombre de personnes, de mes collègues, de mes amis et de ma famille. Aussi, par pudeur et pour n'oublier personne, je me limiterai aux remerciements de rigueur.

Je souhaite d'abord présenter de très sincères remerciements à l'institution qu'est la Fédération Française de Rugby, pour m'avoir permis de mener à bien ce travail de thèse. Avec une pensée particulière pour Didier Retière, qui a permis en tant que DTN la mise en place de tous mes travaux de recherche au sein même des équipes de France, pour Julien Piscione, qui m'a soutenu quotidiennement dans mon travail et a essayé de mettre en place l'environnement optimal pour mener à bien mes travaux de recherche, et Mathieu Lacome, sans qui rien n'aurait été possible, l'ami, l'oreille, le conseiller.

Je souhaite remercier chaleureusement mes directeurs de thèse, Nicolas Babault et Christopher Carling, pour leur confiance, leur aide, leurs conseils avisés. Cinq années pour comprendre qu'il était possible d'apprécier un anglais !

Je ne peux pas oublier tous mes collègues et amis qui sont ou sont passés par la FFR et qui au détour de moments formels ou informels m'ont apporté leur soutien, pour cela un grand merci !

Je vais terminer par mes parents, ma mère, cette femme si forte, mes frères et belles-sœurs, MA FAMILLE, et mes amis, grâce à qui je n'ai rien lâché malgré les tourments de la vie. Et surtout merci à toi Ambre, pour ton soutien sans faille, merci de toujours m'avoir supporté, de m'avoir donné la force et la confiance nécessaire pour aller au bout.

« Il l'a dit, il l'a fait, grand homme ! » « Grand c.. oui ! »

À mon papa,

Publications

Ce travail a fait l'objet des publications suivantes :

Peeters, A., Piscione, J., Lacome, M., Carling, C., Babault, N. (2023). A comparison of running and contact loads in U18 and U20 international rugby union competition. *Biology of Sport*, 40(1): 149-160.

Peeters, A., Leduc, C., Piscione, J., Lacome, M., Carling, C., Babault, N. (2022). Anthropometric and physical characteristics in U16, U18 and U20 elite French youth Rugby Union players. *Journal of Strength & Conditioning Research*. Soumis.

Autres publications :

Couderc, A., Gabbett, T.J., Piscione, J., Robineau, J., **Peeters, A.**, Igarza, G., Thomas, C., Hanon, C., Lacome, M. (2019). Repeated High-Intensity Effort Activity in International Male Rugby Sevens. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 22, 22.

Lacome, M., **Peeters, A.**, Mathieu, B., Marrier, B., Carling, C., Piscione, J. (2019). Can we use GPS for assessing sprinting performance in rugby sevens? A concurrent validity and between-device reliability study. *Biology of Sport*, 36(1): 25-29.

Marrier, B., Durguerian, A., Robineau, J., Chennaoui, M., Sauvet, F., Servonnet, A., Piscione, J., Mathieu, B., **Peeters, A.**, Lacome, M., Morin, J.B., Le Meur, Y. (2019). Preconditioning strategy in rugby-7s players: beneficial or detrimental? *International journal of sports physiology and performance*, 14(7): 918-926.

Peeters, A., Carling, C., Piscione, J., Lacombe, M. (2019). In-Match Physical Performance Fluctuations in International Rugby Sevens Competition. *Journal of sports science & medicine*, 18(3): 419-426.

Ramírez-López, C., Till, K., Sawczuk, T., Giuliano, P., **Peeters, A.**, Beasley, G., Murray, F., Pledger, S., Read, D., Jones, B. (2020). A multi-nation examination of the fatigue and recovery time course during the inaugural Under-18 Six Nations rugby union competition. *Journal of Sports Sciences*, 38(6): 644-651.

Robineau, J., Marrier, B., Le Meur, Y., Piscione, J., **Peeters, A.**, Lacombe, M. (2020). “Road to Rio”: A case study of workload periodization strategy in Rugby-7s during an Olympic season. *Frontiers in Sports and Active Living*, 1: 72.

Clavel, P., Leduc, C., Morin, J.B., Owen, C., Samozino, P., **Peeters, A.**, Buchheit, M., Lacombe, M. (2022). Concurrent Validity and Reliability of Sprinting Force–Velocity Profile Assessed With GPS Devices in Elite Athletes. *International journal of sports physiology and performance*, 1(aop): 1-5.

Ramírez-López, C., Till, K., Weaving, D., Boyd, A., **Peeters, A.**, Beasley, G., Bradley, S., Giuliano, P., Venables, C., Jones, B. (2022). Does perceived wellness influence technical–tactical match performance? A study in youth international rugby using partial least squares correlation analysis. *European journal of sport science*, 22(7): 1085-1093.

Résumé

Pour s'assurer une réussite sportive sur le long terme, une institution comme la Fédération Française de Rugby (FFR) se doit de mettre en place une politique sportive de développement du jeune joueur dès le plus jeune âge. Ainsi, des structures de formation fédérales ont été mises en place regroupant des joueurs de 15 ans (catégorie moins de 16 ans (U16)), à 17 ans puis le développement se poursuit en club. Le parcours des jeunes joueurs peut être jalonné de sélections en équipe de France U18 ou U20, les deux seules sélections nationales jeunes de la FFR. La volonté de la FFR pour ce travail de thèse a été de décrire l'environnement de développement physique du jeune joueur de rugby français de son entrée dans le projet de performance fédéral (PPF) en U16 et jusqu'à l'équipe de France U20. Pour cela, nous nous sommes d'abord attachés à décrire les caractéristiques anthropométriques et physiques des joueurs qui ont été internationaux (INT) avec le XV de France ou l'équipe de France U20 et des non-internationaux (NI) (Étude 1). Nous avons pu mettre en évidence une nette progression des caractéristiques anthropométriques et des qualités physiques tout au long du parcours de développement des jeunes joueurs d'élite français. En outre, les résultats ont permis de distinguer que la force, la puissance et la vitesse étaient des qualités nécessaires pour atteindre le niveau international. Ensuite, nous avons souhaité évaluer les exigences physiques des matchs internationaux U18 et U20 en analysant le déplacement et l'activité de combat au travers d'une analyse moyenne du match et des séquences spécifiques (lors du temps de jeu effectif et lors de séquences maximales d'activité) (Étude 2). Les demandes physiques observées chez les joueurs internationaux U18 suggèrent qu'ils sont prêts à répondre aux exigences moyennes et maximales observées dans les compétitions U20. Un focus spécifique sur la capacité à enchaîner les actions de contacts chez les U18, et notamment chez les avants est suggéré pour

être capable de pouvoir répondre à l'exigence maximale de contact des matchs U20. Pour finir, nous avons souhaité caractériser le niveau d'état de forme des joueurs internationaux U18 et U20 suite aux matchs internationaux, en évaluant l'impact de la charge externe du match sur les marqueurs de l'état de forme (Étude 3). Parmi les tests utilisés dans la batterie d'état de forme (CMJ, [CK] et le questionnaire), seule la [CK] est un critère discriminant les catégories avec des concentrations plus importantes observées chez les U20 par rapport aux U18. Nous avons observé que les variables de temps de jeu et du nombre de contacts présentent un impact néfaste sur les marqueurs d'état de forme. De plus, les résultats ont permis de distinguer une forte hétérogénéité dans les niveaux d'état de forme entre les joueurs, renforçant l'importance d'une évaluation individuelle systématique post-match. Tous ces résultats ont permis de faire la lumière sur la spécificité du niveau international jeune. Ce travail de thèse a permis à la FFR de créer des référentiels d'analyse de l'évolution physique des joueurs ou de leurs performances en match. Ce qui représente des informations capitales, vulgarisées et communiquées aux structures de formation fédérales afin de planifier le programme de développement des joueurs au plus près des exigences du plus haut niveau jeune.

Abstract

To ensure long-term sporting success, a governing body such as French Rugby Union (FFR) must implement a physical development plan from the youth to senior player. In this way, federal academies have been created for players from 15 years old (category under 16 (U16)), to 17 years old after which their development is continued in elite club environments. Over the course of their youth career, players can be selected for the French U18 or U20 national teams (the only two national French youth teams). The aim of this thesis was to describe the physical development of young French rugby players from their entry into the Federation's national pathway (U16 to U20 level). For this, we first described the anthropometric and physical characteristics of players who had been international (INT) with the French national team or the French U20 team and non-international players (NI) (Study 1). Results showed a clear progression in anthropometric characteristics and physical qualities throughout the development of young French elite players. Furthermore, the results showed that among the physical qualities examined, strength, power and speed were the the main characteristics required to reach international level. Secondly, we evaluated the physical match demands of U18 and U20 international matches by analysing general movement and contact-loads (for entire matches) and efforts during ball in play [effective playing time] and peak activity sequences (Study 2). The match demands observed in the present international U18 players suggested that they were able to respond to the overall and peak demands observed in U20 competition. A specific focus on the ability to repeat contact actions in U18s, especially forwards, is suggested to be able to respond to the peak contact load of U20 matches. Finally, we described the fatigue responses of U18 and U20 following international matches, and assessed the potential relationships with external match-load (Study 3). Amongst the tests

included (i.e. CMJ, [CK] and a self-reported questionnaire), only [CK] was a discriminating factor with higher concentrations observed in U20s compared to U18s. Moreover, playing time and contact-load had a negative impact on time-course recovery. Finally, a high between-player variability in fatigue responses were observed reinforcing the importance of an individualised systematic post-match assessment.

Overall, these results highlighted the specificity of the Elite French youth pathway. This thesis has enabled the FFR to create references and benchmarks to monitor the physical evolution and match performances. This important information has been communicated to the different stakeholders in each federal academy nationwide in order to help plan the player development program as closely as possible to the requirements of the highest youth level of play.

Sommaire

i. Remerciements	ii. Liste des publications	iii. Résumé	
LISTE DES TABLEAUX			15
LISTE DES FIGURES			17
LISTE DES ABRÉVIATIONS			19
1. INTRODUCTION			22
2. CADRE THÉORIQUE			27
2.1. LES CARACTÉRISTIQUES ANTHROPOMÉTRIQUES ET PHYSIQUES DES JOUEURS			27
2.1.1. Intérêt de l'évaluation des caractéristiques anthropométriques et physiques			27
2.1.2. Les caractéristiques anthropométriques			27
2.1.2.1. La taille et la masse corporelle chez les séniors			28
2.1.2.2. Les caractéristiques anthropométriques des jeunes joueurs			32
2.1.3. Caractéristiques physiques			39
2.1.3.1. Les qualités de force et de puissance musculaire			39
2.1.3.1.1. L'évaluation de la force et la puissance			40
2.1.3.1.2. L'évaluation de la force et la puissance chez les séniors			46
2.1.3.1.3. L'évaluation de la force et la puissance chez les jeunes			47
2.1.3.2. Les qualités de vitesse			51
2.1.3.2.1. L'évaluation de la vitesse			51
2.1.3.2.2. L'évaluation de la vitesse chez les séniors			54
2.1.3.2.3. L'évaluation de la vitesse chez les jeunes			56
2.1.3.3. Les qualités énergétiques			63
2.1.3.3.1. Les différentes méthodes d'évaluation			63
2.1.3.3.2. L'évaluation des qualités énergétiques chez les séniors			69
2.1.3.3.3. L'évaluation des qualités énergétiques chez les jeunes			71

2.2. L'ANALYSE DU DÉPLACEMENT ET DE L'ACTIVITÉ SPÉCIFIQUE DE COMBAT	79
2.2.1. Les outils d'analyse	79
2.2.1.1. Le déplacement	79
2.2.1.1.1. Le GPS	82
2.2.1.1.2. Les métriques	85
2.2.1.2. L'activité de combat	89
2.2.2. Les différents types d'analyse	92
2.2.2.1 Analyse globale du match.....	92
2.2.2.2. Analyse des séquences de temps de jeu effectif	105
2.2.2.3. Analyse des séquences maximales d'activité	111
2.3. L'ANALYSE DE LA FATIGUE POST-MATCH.....	122
2.3.1. Les mécanismes de la fatigue.....	122
2.3.2. L'évaluation de la fatigue.....	124
2.3.2.1. La fonction neuromusculaire	124
2.3.2.1.1. Les modifications de la fonction neuromusculaire (CMJ) chez les séniors	125
2.3.2.1.2. Les modifications de la fonction neuromusculaire (CMJ) chez les jeunes	127
2.3.2.2. Marqueur de dommages musculaires : la créatine kinase.....	129
2.3.2.2.1. Les modifications de concentration des marqueurs de dommages musculaires chez les séniors.....	131
2.3.2.2.2. Les modifications de concentration des marqueurs de dommages musculaires chez les jeunes.....	132
2.3.2.3. Questionnaire d'état de forme.....	133
2.3.2.3.1. Les modifications de l'état de forme chez les séniors.....	135
2.3.2.3.2. Les modifications de l'état de forme chez les jeunes.....	136
3. PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE	138

4. ÉTUDE 1	140
4.1. INTRODUCTION	141
4.2. MÉTHODE.....	143
4.2.1. Approche expérimentale du problème	143
4.2.2. Participants	143
4.2.3. Procédures	145
4.2.4. Analyse statistique.....	149
4.3. RÉSULTATS.....	149
4.4. DISCUSSION.....	163
4.4.1. Limites.....	168
4.4.2. Conclusion.....	169
4.5. APPLICATIONS PRATIQUES	169
5. ÉTUDE 2	171
5.1. INTRODUCTION	172
5.2. MÉTHODE.....	174
5.2.1. Approche expérimentale du problème	174
5.2.2. Participants	175
5.2.3. Procédures de collecte des données	176
5.2.4. Analyse statistique.....	179
5.3. RÉSULTATS.....	179
5.4. DISCUSSION.....	189
5.4.1. Limites.....	193
5.4.2. Conclusion.....	194
5.5. APPLICATIONS PRATIQUES	195
6. ÉTUDE 3	196
6.1. INTRODUCTION	197
6.2. MÉTHODE.....	200

6.2.1. Approche expérimentale du problème	200
6.2.2. Participants	200
6.2.3. Procédures de collecte des données	201
6.2.4. Analyse statistique.....	205
6.3. RÉSULTATS.....	206
6.4. DISCUSSION.....	214
6.4.1. Limites.....	218
6.4.2. Conclusion.....	219
6.5. APPLICATIONS PRATIQUES	220
7. CONCLUSIONS GÉNÉRALES, PERSPECTIVES ET APPLICATIONS PRATIQUES.....	221
7.1. CONCLUSION GÉNÉRALE.....	221
7.2. APPLICATIONS PRATIQUES	232
7.3. LIMITES.....	233
7.4. PERSPECTIVES	234
8. BIBLIOGRAPHIE	236

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Études présentant les caractéristiques anthropométriques des joueurs de rugby seniors.....	29
Tableau 2.2 : Études présentant les caractéristiques anthropométriques des jeunes joueurs de rugby à différentes catégories d'âge.....	34
Tableau 2.3 : Les méthodes d'évaluation de la force et de la puissance dans le rugby.	44
Tableau 2.4 : Les méthodes d'évaluation de la vitesse dans le rugby.....	52
Tableau 2.5 : Études présentant les caractéristiques de vitesse des jeunes joueurs de rugby à différentes catégories d'âge.....	57
Tableau 2.6 : Différents protocoles d'évaluation de la capacité à répéter les sprints en rugby.	67
Tableau 2.7 : Études présentant les caractéristiques énergétiques des jeunes joueurs de rugby à différentes catégories d'âge.....	72
Tableau 2.8 : Exemple de classification des efforts lors d'une analyse notationnelle (sur la base des travaux de Deutsch et al. (2007))......	80
Tableau 2.9 : Nature des contacts en rugby à XV.	89
Tableau 2.10 : Études présentant les distances totales et/ou relatives parcourues au cours d'un match de rugby à XV en fonction de la catégorie, du niveau et du poste.	95
Tableau 4.1 : Résultats du modèle mixte ANOVA pour chaque poste.....	151
Tableau 4.2 : Caractéristiques anthropométriques et physiques des Avants internationaux et non internationaux par catégorie d'âge.	154
Tableau 4.3 : Caractéristiques anthropométriques et physiques des Arrières internationaux et non internationaux par catégorie d'âge.	156
Tableau 5.1 : Âge et caractéristiques anthropométriques des joueurs U18 et U20.....	175

Tableau 5.2 : Variables contextuelles des matchs étudiés.....	177
Tableau 5.3 : Comparaisons de l'activité de course et de contact par minute de jeu entre les joueurs U18 et U20 pour l'ensemble de l'équipe et pour les postes d'avants et d'arrières.....	181
Tableau 5.4 : Comparaison de l'activité de course et de contact par minute pendant les séquences de TJE comprises entre 30 s et 60 s entre les joueurs U18 et les U20 pour l'ensemble de l'équipe et pour les postes d'avants et d'arrières.....	183
Tableau 5.5 : Comparaison de l'activité de course et de contact par minute pendant les séquences de TJE comprises entre 60 s et 90 s entre les joueurs U18 et les U20 pour l'ensemble de l'équipe et pour les postes d'avants et d'arrières.....	184
Tableau 5.6 : Comparaison de l'activité de course et de contact par minute pendant les séquences de TJE de >90 s entre les joueurs U18 et les U20 pour l'ensemble de l'équipe et pour les postes d'avants et d'arrières.	185
Tableau 6.1 : Nombre d'observations par test de la batterie d'état de forme en fonction de la catégorie d'âge et du poste des joueurs.	201
Tableau 6.2 : Résultats du modèle mixte ANOVA mesurant les différences entre les postes et les catégories pour chaque variable de charge externe.	208
Tableau 6.3 : Résultats du modèle mixte ANOVA pour chaque test de la batterie d'évaluation de l'état de forme.....	210
Tableau 6.4 : Matrice des corrélations entre les variables d'état de forme et les variables de charge externe.	212
Tableau 6.5 : Estimation de l'effet des variables de catégorie, de poste et de charge externe sur les variables d'état de forme.....	213

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Exemple des relations force-vitesse (courbe pleine) et puissance vitesse (courbe pointillée)	40
Figure 2.2 : Détermination des paramètres de V_0 , F_0 et P_{max} à partir des relations force-vitesse et puissance-vitesse	41
Figure 2.3 : Principe de détermination de la position par le système GPS	82
Figure 2.4 : Circuit de déplacement en sport collectif	84
Figure 2.5 : Schéma montrant une configuration optimale des satellites (A) et une mauvaise configuration (B).....	85
Figure 2.6 : Distances relatives réalisées par groupe de poste sur des périodes maximales d'activités allant de 1- à 10-min.....	114
Figure 2.7 : Nombre relatif d'accélération réalisées par groupe de poste sur des périodes maximales d'activité allant de 1- à 10-min.....	115
Figure 2.8 : DR et distance HI relative sur des périodes pic d'activité allant de 60 à 300 s. D'après les travaux de Cunningham et al. (2018a),	116
Figure 2.9 : Distances relatives réalisées par les avants et les arrières sur des périodes maximales d'activités allant de 1- à 10-min.....	118
Figure 2.10 : Nombre relatif de contacts réalisés par les avants et les arrières sur des périodes maximales d'activité allant de 1- à 10-min.....	119
Figure 4.1 : Diagramme d'inclusion des participants.....	144
Figure 4.2 : Schéma représentant le design de l'étude	146
Figure 4.3 : Représentation graphique des caractéristiques anthropométriques des joueurs U16, U18 et U20 en fonction du statut et du poste	160

Figure 4.4 : Représentation des caractéristiques de force et de puissance des joueurs U16, U18 et U20 en fonction du statut et du poste	161
Figure 4.5 : Représentation des caractéristiques aérobies et de vitesse des joueurs U16, U18 et U20 en fonction du statut et du poste	162
Figure 5.1 : Comparaison de la distribution de fréquence des séquences de TJE entre les matches des U18 et des U20.....	182
Figure 5.2 : Comparaison de l'activité de déplacement associée aux séquences pics de DT entre les avants et entre les arrières aux niveaux U18 et U20.....	187
Figure 5.3 : Comparaison du nombre de contacts associés aux séquences pics de contact entre les avants et entre les arrières aux niveaux U18 et U20.....	188
Figure 6.1 : Représentation des variables de charge externe mesurées lors de matchs internationaux U18 et U20 en fonction du poste.....	207
Figure 6.2 : Graphiques représentant les variables d'état de forme testées en fonction de la catégorie et du poste.....	209

LISTE DES ABRÉVIATIONS

1L	Première Ligne
2L	Deuxième Ligne
3L	Troisième Ligne
30-15IFT	30-15 Intermittent Fitness Test
ATP	Adénosine TriPhosphate
BAM	Brief Assessment of Mood
CCI	Coefficient de Corrélation Intraclasse
CK	Créatine Kinase
CMJ	CounterMovement Jump
CV	Coefficient de Variation
DC	Développé Couché
DHI	Distance Haute Intensité
DHV	Distance Haute Vitesse
DJ	Drop Jump
DR	Distance Relative
DT	Distance Totale
DTHV	Distance Très Haute Vitesse
ET	Écart Type
FFR	Fédération Française de Rugby
GPS	Global Positioning System
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision
HI	Haute Intensité
IC	Intervalle de Confiance
IRB	International Rugby Board

LNR	Ligue Nationale de Rugby
MSFT	Multi Stage Fitness Test
MTS	Meilleur Temps au Sprint
PL	Player Load
Plslow	Player Load Slow
Pmax	Puissance Maximale
POMS	Profile Of Mood States
PPF	Projet de Performance Fédéral
RFD	Rate of Force Development
RM	Répétition Maximale
RS ²	Rugby-Specific Repeated-Speed
RSA	Repeated-Sprint Ability
RTV:C	Ratio Temps de Vol : Contraction
SJ	Squat Jump
SWC	Smallest Worthwhile Change
TE	Taille de l'Effet
TJE	Temps de Jeu Effectif
TMS	Temps Moyen des Sprints
TUB II	Test de l'Université de Bordeaux 2
TTS	Temps Total des Sprints
U16	Under 16 years old - Moins de 16 ans
U18	Under 18 years old - Moins de 18 ans
U20	Under 20 years old - Moins de 20 ans
U21	Under 21 years old - Moins de 21 ans
UA	Unité Arbitraire
VMA	Vitesse Maximale Aérobie

Vmax	Vitesse M aximale
Vmin	Vitesse M inimale
VO2max	Débit maximal de consommation d'oxygène
vs	V ersus
Yo-Yo IR1	Y o- Y o I ntermittent R ecovery level 1

1. INTRODUCTION

Le rugby, ce sport qui prend racine chez nos adversaires les anglais, dans la ville bien nommée de Rugby, fait son apparition en 1823 suite à l'intervention remarquée du jeune William Webb Ellis. La légende raconte qu'à l'occasion d'un match de football, l'étudiant aurait pris le ballon à la main, bravant ainsi l'une des règles essentielles de ce sport. Le Rugby naissait. Une codification de cette nouvelle pratique fut inventée dans les années 1840. Après de nombreuses évolutions dans les règles, plusieurs formes de rugby ont émergé et avec elles toute une déclinaison d'activités : le rugby à XV, le rugby à X, le rugby à 7, le rugby à XIII, le rugby à 9. Notre propos se portera exclusivement sur le rugby à XV, appelé « Rugby Union » par nos voisins anglo-saxons. Comme son nom peut l'indiquer, deux équipes de 15 joueurs s'opposent lors d'un match de 70 minutes chez les jeunes jusqu'à la catégorie des moins de 18 ans (U18 selon la catégorisation de la fédération internationale, World Rugby), et 80 minutes au-delà de 18 ans. Ces 15 joueurs se séparent en deux grands groupes de postes, spécifiques à leur rôle sur le terrain : les avants (8 joueurs) et les arrières (7 joueurs). Les avants sont composés d'une première ligne : le pilier gauche (n°1) le talonneur (n°2) et le pilier droit (n°3) ; d'une deuxième ligne (n°4 et 5) (les premières et deuxièmes lignes sont surnommées « le cinq de devant ») et d'une troisième ligne : les troisièmes lignes ailes (n° 6 et 7) et le troisième ligne centre (n°8). Les arrières sont composés d'une charnière : le demi de mêlée (n°9) et le demi d'ouverture (n°10), les centres (n°12 et 13) et les joueurs du champ profond, du troisième rideau : les ailiers (n°11 et 14) et l'arrière (n°15).

La professionnalisation du rugby, à partir de 1995, s'est accompagnée au-delà des aspects contractuels, d'importants changements dans l'approche de la compétition. L'entraînement a progressivement été pris en charge par des entraîneurs de plus en plus experts. D'abord des entraîneurs seuls à tout gérer, aujourd'hui ils sont de véritables spécialistes d'une phase très précise du jeu : l'attaque, la défense, le jeu au pied, la touche ... Le secteur de la préparation

physique ne fait pas figure d'exception. D'une personne sensibilisée à la préparation physique athlétique des joueurs, nous trouvons aujourd'hui un staff d'au moins trois à quatre spécialistes chez les professionnels : de l'entraînement de la force, de l'entraînement de la vitesse, de la réathlétisation, un spécialiste de la quantification de la charge de travail ... Cette mutation se traduit également par un accompagnement du joueur jusqu'aux aspects les plus invisibles de sa performance, comme sa nutrition, son sommeil, ses aptitudes mentales, le tout basé sur des piliers scientifiques forts. Plus rien n'est laissé au hasard pour optimiser au mieux l'état physique du joueur, afin qu'il performe de façon ponctuelle ou sur une saison. Cet accompagnement et les moyens pour y parvenir se sont petit à petit déclinés des joueurs seniors vers les catégories de jeunes joueurs. Pendant longtemps, l'entraînement du jeune joueur n'a été que l'application d'un modèle identique à celui proposé aux plus anciens (Bergeron et al. 2015, Lloyd et al. 2016, Phibbs et al. 2017). Ceci étant en partie due à une littérature scientifique surtout portée sur les seniors, et donc encore assez pauvre sur l'évaluation physique et physiologique des jeunes joueurs et la description de l'exigence de leurs compétitions.

À notre connaissance, la littérature traitant des jeunes joueurs de rugby (de moins de 18 ans à moins de 20 ans) est très peu fournie et quasiment exclusivement orientée vers un niveau régional ou national. Plusieurs études, notamment anglo-saxonnes, ont décrit les caractéristiques anthropométriques et physiques des jeunes évoluant à ces niveaux (Darrall-Jones et al. 2015, Darrall-Jones et al. 2016b, Jones et al. 2018, Owen et al. 2020). Quelques études se sont intéressées à la caractérisation physique de la population jeune de niveau international, mais surtout chez des nations du tiers deux au classement international World Rugby, comme le Portugal (Vaz et al. 2015) ou le Canada (Barr et al. 2014). Du côté des nations du haut de classement international, nous n'avons recensé qu'une étude décrivant l'évolution physique des jeunes U20 sud-africains évoluant au niveau national (Lombard et al. 2015). On

constate depuis un manque de données plus récentes. De la même façon, l'activité de déplacement des rencontres à un niveau régional ou national a été décrite à plusieurs reprises (Read et al. 2017a, Read et al. 2017b, Read et al. 2018a, Read et al. 2019, Till et al. 2020). Ces auteurs se sont attachés à décrire l'exigence physique liée au déplacement des joueurs (distance totale, distance parcourue à haute vitesse), ainsi que la charge liée aux contacts inerrant au rugby. Pour autant, le spectre scientifique de l'analyse de la performance en match chez les jeunes est assez peu fourni, surtout au niveau international. Du côté des moins de 20 ans (U20) internationaux, seules quelques publications scientifiques font état des exigences physiques de déplacements en match, ont été recensées (Cunningham et al. 2016a, Cunningham et al. 2016b, Carling et al. 2017). Et à notre connaissance, seule une étude a traité du niveau international moins de 18 ans (U18), analysant la fatigue en compétition (Ramírez-López et al. 2020b).

Afin de compléter la connaissance des exigences physiques des matchs internationaux chez les jeunes et pour aller dans le sens des applications spécifiques liées à la charge de travail préconisée à la reprise de l'entraînement, il convient d'évaluer l'impact de ces rencontres sur des marqueurs de la fatigue (marqueurs biologiques, neuromusculaires ou psychologiques) en lien avec les performances en match (distance parcourue, nombre de placages réalisés ...). En effet, les hauts niveaux d'intensité de déplacement et la large part d'actions liées au contact que l'on retrouve dans le rugby peuvent induire une fatigue (Quarrie and Hopkins 2007). Cette fatigue peut se définir comme une incapacité à maintenir un niveau de force donné, combinée à une augmentation de la sensation de fatigue (Place and Millet 2020). Il a été montré qu'un match de rugby pouvait induire des perturbations biochimiques, métaboliques, neuromusculaires et de la perception subjective de l'état physique pendant environ 96 heures (Tavares et al. 2017). Ces mêmes auteurs définissent la récupération comme le temps nécessaire pour retrouver des performances similaires ou d'un niveau supérieur à celles post entraînement ou compétition (Tavares et al. 2017). Banister et al. (1975) ont proposé que la performance d'un

athlète pendant la compétition ou l'entraînement puisse être estimée à partir de la différence entre les fonctions négatives ("fatigue") et positives ("forme physique") de l'entraînement. Ainsi, pour atteindre une performance athlétique optimale, un bon équilibre entre le stress de l'entraînement/compétition et une récupération appropriée est nécessaire. Si la récupération est inadaptée, une dégradation des performances et une augmentation du risque de blessures peuvent survenir (Meeusen et al. 2013). Pour s'assurer que les joueurs atteignent un niveau de récupération suffisant, les membres du staff médical et des sciences du sport s'attachent à surveiller l'état des joueurs dans les jours (de 1 à 3 jours) qui suivent les matchs et tout au long de la semaine d'entraînement. Pour cela, des questionnaires d'état de forme ou des évaluations objectives (neuromusculaires ou biochimiques) peuvent être utilisés. Ces outils de surveillance offrent aux praticiens la possibilité d'adapter le contenu de l'entraînement au niveau de chaque joueur et, par conséquent, d'améliorer les performances et de diminuer le risque de blessure. Cependant, malgré l'intérêt explicite, plusieurs défis pratiques demeurent comme les contraintes de temps au sein du cycle de travail, la logistique, l'analyse des données, l'intensité des tests rendant l'évaluation du niveau de fatigue difficile dans le contexte des sports d'équipe (avoir l'adhésion du staff et des joueurs), ce qui suggère que des méthodes de test plus pratiques sont sans doute nécessaires (Buchheit et al. 2018).

Pour compléter la compréhension de l'environnement compétitif dans lequel évoluent les jeunes joueurs internationaux, il serait souhaitable d'évaluer l'impact d'un match sur des marqueurs de l'état de forme comme des marqueurs neuromusculaires, biochimiques ou psychologiques. Seules deux études font état de la fatigue post-match au niveau international U20 (Lacome et al. 2018) ou U18 (Ramírez-López et al. 2020b). Le champ de la littérature doit encore être alimenté par de nouvelles données.

L'objectif principal de ce travail de thèse est donc de décrire l'environnement de développement du jeune joueur de rugby au sein de la filière de formation française, avec comme fil conducteur l'investigation des populations jeunes internationales. Pour cela, trois axes de travail ont été abordés, répondant conjointement à l'objectif de thèse. Le premier axe a traité des caractéristiques anthropométriques et physiques. Le second a décrit les exigences physiques des matchs internationaux. Et dans le troisième, nous avons analysé la fatigue post-match liée aux exigences précédemment décrites. Pour mener à bien ces objectifs, trois études ont été réalisées :

Étude 1 : L'objectif est de décrire les caractéristiques anthropométriques et physiques des jeunes joueurs de rugby élités de U16 à U20 dans le parcours de formation français. Pour cela, nous allons :

- Caractériser les spécificités anthropométriques et physiques par catégorie d'âge.
- Comparer les joueurs internationaux et les non internationaux par catégorie d'âge.

Étude 2 : L'objectif est de décrire les exigences physiques des matchs U18 et U20 internationaux. Pour cela, nous allons :

- Caractériser finement les exigences de déplacement et de l'activité spécifique de combat des matchs internationaux pour chaque catégorie d'âge.
- Comparer les exigences de déplacement et combat entre les catégories d'âge.

Étude 3 : L'objectif est d'analyser l'impact des rencontres internationales sur des marqueurs de l'état de forme sur la population identifiée. Pour cela, nous allons :

- Caractériser objectivement l'état de forme post-match au moyen de marqueurs biologiques et neuromusculaires pour chaque catégorie d'âge.
- Comparer les niveaux d'état de forme post-match entre les catégories d'âge.

2. CADRE THÉORIQUE

2.1. LES CARACTÉRISTIQUES ANTHROPOMÉTRIQUES ET PHYSIQUES DES JOUEURS

2.1.1. Intérêt de l'évaluation des caractéristiques anthropométriques et physiques

Les caractéristiques anthropométriques et physiques sont connues pour avoir un rôle prépondérant dans la performance sportive (Quarrie et al. 1996, Duthie et al. 2003, Smart et al. 2014, Ross et al. 2015), pour l'identification des jeunes talents (Till et al. 2013, Till et al. 2016), l'identification des caractéristiques d'un poste (Quarrie et al. 1996, Quarrie et al. 2013, Reardon et al. 2015), ou les caractéristiques d'un niveau de pratique (Rigg and Reilly 1988, Quarrie et al. 1995, Argus et al. 2012, Darrall-Jones et al. 2015, Read et al. 2017a). Aussi, elles peuvent rentrer comme critères principaux dans la sélection et/ou la détection de joueurs, comme les tests lors des drafts dans les franchises de football américain. Ces précieuses informations serviront à évaluer la progression d'un joueur tout au long de son développement physique à travers les catégories d'âge, à créer des profils de joueurs en fonction de leur niveau de pratique (professionnel vs amateur, international vs non-international), ou de leur poste, et pourront permettre de juger l'évolution des étapes du plan de développement physique d'un joueur. Il est donc primordial de régulièrement tester le joueur afin d'évaluer le travail réalisé et sa progression pour réajuster ses objectifs de développement ou son parcours pour y parvenir (Duthie 2006, Owen et al. 2020).

2.1.2. Les caractéristiques anthropométriques

Pierre Danos, ancien joueur international français des années cinquante, disait : « Au rugby, il y a ceux qui jouent au piano, et ceux qui les déménagent », sous-entendu que chacun a son rôle sur le terrain et qu'en fonction de celui-ci le profil des joueurs diffère. Maud (1983) décrivait

déjà au début des années 80 des profils anthropométriques très hétérogènes en fonction des postes. La taille et la masse corporelle deviennent dès lors des critères de spécificité du poste (Duthie et al. 2003, Stoop et al. 2019).

2.1.2.1. La taille et la masse corporelle chez les séniors

Déjà en 2001, Olds (2001) faisait le constat, en étudiant l'évolution anthropométrique des joueurs de rugby, qu'une grande taille était un indicateur significatif de la réussite d'un joueur pour jouer au plus haut niveau (Tableau 2.1). Il a été montré que lors des coupes du monde de rugby jusqu'en 2007, les joueurs des lignes arrières des équipes jouant les phases finales (1/4, 1/2 et finale) étaient significativement plus grands que ceux des autres équipes (Sedeaud et al. 2012). Une tendance assez similaire a été observée chez les avants sans être statistiquement validée (Sedeaud et al. 2012). Des résultats qui sont intéressants à envisager comme critères objectifs de sélection et de détection. Pour autant, la méthodologie utilisée par les auteurs de cet article pour la récolte des données peut être discutable. En effet, ils se sont basés sur les données (tailles et masse) renseignées sur les sites internet des fédérations recoupant les informations avec des sites populaires relayant l'actualité du rugby. Il est alors assez aisé de questionner la pertinence de ces données, bien que la taille à l'âge adulte ne soit pas le critère le plus fluctuant. Quant à la masse, les résultats sont plus discutables. Les auteurs rapportent principalement que les avants des équipes finalistes sont plus lourds que ceux des autres équipes (Sedeaud et al. 2012). Le biais méthodologique devient très problématique par rapport au manque de précision et de fiabilité de la donnée de masse rapportée.

Tableau 2.1 : Études présentant les caractéristiques anthropométriques des joueurs de rugby séniors.

Référence	Niveau	Poste	Taille (cm)	Masse (kg)
Argus et al. (2012)	Semi-Professionnel	Tous les postes	187,2 ± 7,6	100,7 ± 11,5
	Professionnel	Tous les postes	184,7 ± 6,2	103,4 ± 11,2
Crewther et al. (2012)	Professionnel	Tous les postes		103,2 ± 12,4
Delaney et al. (2017b)	Professionnel	Tous les postes	187 ± 8	104,7 ± 13,0
Posthumus et al. (2020)	Professionnel	Tous les postes	187,6 ± 7,6	108,0 ± 14,1
Posthumus et al. (2020)	Professionnel	Tous les postes	187,6 ± 7,6	108,0 ± 14,1
Vaz et al. (2014)	National	Avants	184,4 ± 6,3	100,7 ± 12,9
Quarrie and Hopkins (2007)	Professionnel	Avants	190,1 ± 1,0	111,1 ± 2,9
Lacome et al. (2014)	Professionnel	Avants	188 ± 7	108,3 ± 8,2
Zemski et al. (2015)	Professionnel	Avants	191,0 (187,7 à 194,3)	111,7 (108,1 à 115,2)
Cunningham et al. (2018b)	Professionnel	Avants		115,8 ± 7,3
Posthumus et al. (2020)	Professionnel	Avants	190,9 ± 5,9	116,5 ± 10,1

Tableau 2.1 : Études présentant les caractéristiques anthropométriques des joueurs de rugby seniors (suite).

Référence	Niveau	Poste	Taille (cm)	Masse (kg)
Vaz et al. (2014)	National	Arrières	180,6 ± 7,1	88,0 ± 11,4
Quarrie and Hopkins (2007)	Professionnel	Arrières	182,9 ± 0,8	95,7 ± 2,3
Lacome et al. (2014)	Professionnel	Arrières	183 ± 5	94,0 ± 8,2
Zemski et al. (2015)	Professionnel	Arrières	182,6 (180,0 à 185,3)	91,7 (89,1 à 94,3)
Cunningham et al. (2018b)	Professionnel	Arrières		94,5 ± 9,6
Posthumus et al. (2020)	Professionnel	Arrières	183,0 ± 7.5	95,9 ± 9,4

Il a été démontré que les avants étaient significativement plus grands et plus lourds que les arrières (Duthie et al. 2003, Fontana et al. 2015). Aussi, il a été proposé comme hypothèse qu'une masse corporelle « élevée » permettrait aux joueurs, notamment les avants, un meilleur dynamisme, momentum, dans les placages ou autres formes de collisions (Gabbett et al. 2008, Hendricks et al. 2014a, Brazier et al. 2020) et augmenterait la force produite en mêlée (Quarrie and Wilson 2000). Aussi, la masse corporelle des avants s'apparente à une forme de mécanisme de prévention des blessures liées au contact, ces joueurs étant plus exposés aux contacts avec un plus faible risque de blessure (Brazier et al. 2020), cela étant sans doute lié à une vitesse plus faible des avants au moment du contact. Malgré les arguments évoqués, quelle que soit leur masse, les joueurs la subissent tout au long du match au travers de leur déplacement. Et bien qu'avantageuse sur certaines phases de jeu (collisions, mêlées), cette masse corporelle plus élevée va induire un coût énergétique plus conséquent (Fuller et al. 2013). Il est donc primordial de trouver l'équilibre en prenant en compte le poste et donc le rôle du joueur sur le terrain.

Des paramètres de taille et de masse étaient calculés un indice de masse corporelle, à savoir la masse divisée par la taille au carré. Olds (2001) constate une réelle augmentation de l'indice de masse corporelle entre 1975 et le début des années 2000. L'auteur constate que cette augmentation est principalement liée à l'augmentation de la masse des joueurs (qui est supérieure à l'augmentation de masse observée dans une population séculaire). En effet, la taille a eu la même évolution entre les joueurs de rugby testés et une population séculaire. Par ailleurs, les indices de masses corporelles observés chez une population de rugbymen ont tendance à surestimer la prévalence à des niveaux d'obésité, en particulier les avants (King et al. 2005). On constate que l'utilisation de l'indice de masse corporelle dans une population de sportifs, notamment dans les sports dits de force et de puissance est contestée (Duthie 2005), notamment par Olds (2001) qui voit l'indice de masse corporelle des joueurs augmenter à mesure que les performances physiques des joueurs s'améliorent. Duthie (2005) affirme qu'un tel indicateur

ne peut être utilisé dans une population de rugbymen pour caractériser le profil anthropométrique des joueurs.

Ces paramètres anthropométriques de taille et de masse ne peuvent pas à eux seuls expliquer la réussite ni la performance en rugby, mais apparaissent comme des déterminants dans l'évolution des joueurs professionnels et leurs profils (Olds 2001, Sedeaud et al. 2012, Sedeaud et al. 2013, Hamlin et al. 2021). Comprendre l'évolution de ces paramètres au cours du développement du joueur dans son parcours de formation doit fournir des éléments objectifs aux entraîneurs afin d'évaluer sa progression et son positionnement par rapport aux références du professionnalisme.

2.1.2.2. Les caractéristiques anthropométriques des jeunes joueurs

Plusieurs études ont étudié les caractéristiques anthropométriques des jeunes joueurs de rugby (Tableau 2.2). Les données provenant de l'étude d'Argus et al. (2012) fournissent les indications les plus complètes sur la différence de taille et de masse corporelle chez des joueurs entre 16 et 24 ans évoluant à différents niveaux de pratique (Tableaux 2.1 et 2.2), tandis que d'autres études se sont centrées sur une catégorie spécifique (Vaz et al. 2015, Dimundo et al. 2021), ou des catégories d'âge combinées (Darrall-Jones et al. 2015, Darrall-Jones et al. 2016b, Wood et al. 2018, Weakley et al. 2019b). Casserly et al. (2019) ont rapporté les changements de taille et de masse corporelle d'un même groupe de 15 joueurs de U18 à U20. Pour finir, Lombard et al. (2015) ont décrit l'évolution des caractéristiques anthropométriques des jeunes U20 d'élite sur une période de 13 années. Les augmentations de taille et de masse corporelle relevées dans cette dernière étude (Lombard et al. 2015) sont semblables à celles rapportées par Quarrie and Hopkins (2007) et Sedeaud et al. (2012) chez les homologues seniors.

Smart and Gill (2013) ont fait partis des premiers auteurs à avoir eu accès à des joueurs de rugby de U14, U16 et U18. Les données présentées auraient pu être intéressantes pour caractériser la taille et la masse corporelle chez les jeunes. Malheureusement, les auteurs ont regroupé les trois catégories d'âge, rendant la lecture et la comparaison peu pertinentes. À la différence de Darrall-Jones et al. (2016b), qui ont proposé une caractérisation des jeunes joueurs d'académie de clubs professionnels par catégorie d'âge (U16, U18 et U21) et par poste (avants et arrières), une caractérisation des différences entre les postes (quel que soit l'âge), ainsi que l'évolution observée des joueurs U16 à U21.

Le consensus qui ressort de l'ensemble des travaux de Darrall-Jones et al. (2016b) est qu'à âges équivalents les avants sont significativement plus grands et plus lourds que les arrières, ce qui est en accord avec les observations sur la population sénior (Duthie et al. 2003, Fontana et al. 2015). Darrall-Jones et al. (2016b) rapportent que chez les U16 les arrières sont plus petits (d de Cohen \pm 90% de l'intervalle de confiance : $-0,95 \pm 0,62$) et plus légers ($-1,71 \pm 0,62$) que les avants. Chez les U18, les arrières sont plus petits ($-1,63 \pm 0,69$) et plus légers ($-2,12 \pm 0,72$) que les avants. Et chez les U21, les arrières sont plus petits ($-1,61 \pm 0,87$) et plus légers ($-1,69 \pm 0,93$) que les avants.

Les travaux de Darrall-Jones et al. (2016b) ont mis en évidence une augmentation significative de la taille et de la masse corporelle entre la catégorie U16 et U18. La taille entre les U18 et les U21 n'apparaît pas différente, quel que soit le poste, alors que la masse corporelle continue d'augmenter. Un constat similaire est observé un peu plus tard sur une population du même âge (Casserly et al. 2019).

Tableau 2.2 : Études présentant les caractéristiques anthropométriques des jeunes joueurs de rugby à différentes catégories d'âge.

Référence	Poste	Âges (ans)	Taille (cm)	Masse (kg)
Dimundo et al. (2021)	Tous les postes	14,6 ± 0,3	171,8 ± 5,9	69,9 ± 11,5
Darrall-Jones et al. (2015)	Tous les postes	15,5 ± 0,3	178,8 ± 7,1	79,4 ± 12,8
Argus et al. (2012)	Tous les postes	16,6 ± 0,8	180,9 ± 8,4	85,5 ± 13,7
Weakley et al. (2019b)	Tous les postes	16,9 ± 0,4	178 ± 7	80,1 ± 10,5
Darrall-Jones et al. (2015)	Tous les postes	16,9 ± 0,5	183,5 ± 7,2	88,3 ± 11,9
Vaz et al. (2015)	Tous les postes	17,9 ± 0,5	179,1 ± 7,0	82,9 ± 13,4
Lombard et al. (2015)	Tous les postes	18,1 ± 0,7	179 ± 9 à 184 ± 7	87 ± 16 à 99 ± 13
Darrall-Jones et al. (2015)	Tous les postes	19,0 ± 1,1	186,7 ± 6,6	98,3 ± 10,4
Argus et al. (2012)	Tous les postes	19,6 ± 1,8	186,9 ± 6,5	95,6 ± 11,0

Tableau 2.2 : Études présentant les caractéristiques anthropométriques des jeunes joueurs de rugby à différentes catégories d'âge (suite).

Référence	Poste	Âges (ans)	Taille (cm)	Masse (kg)
Dimundo et al. (2021)	Avants	14,6 ± 0,3	173,2 ± 3,6	77,2 ± 10,9
Darrall-Jones et al. (2016b)	Avants	15,4 ± 0,3	181,9 ± 6,3	87,6 ± 8,1
	Avants	16,9 ± 0,5	188,1 ± 6,2	93,8 ± 7,0
Casserly et al. (2019)	Avants	U18	188 ± 7	100 ± 6
Vaz et al. (2015)	Avants	18,0 ± 0,5	180,8 ± 4,7	90,3 ± 18,7
Lombard et al. (2015)	Avants	18,1 ± 0,7	181 ± 8 à 188 ± 8	99 ± 9 à 108 ± 7
Wood et al. (2018)	Avants	18,70 ± 0,57	185 ± 6	96,88 ± 9,00
Darrall-Jones et al. (2016b)	Avants	18,9 ± 0,9	190,1 ± 5,6	105,5 ± 8,5
Casserly et al. (2019)	Avants	U19	190 ± 8	102 ± 7
	Avants	U20	190 ± 8	105 ± 5

Tableau 2.2 : Études présentant les caractéristiques anthropométriques des jeunes joueurs de rugby à différentes catégories d'âge (suite).

Référence	Poste	Âges (ans)	Taille (cm)	Masse (kg)
Dimundo et al. (2021)	Arrières	14,6 ± 0,3	170,5 ± 7,3	63,1 ± 7,2
Darrall-Jones et al. (2016b)	Arrières	15,6 ± 0,2	175,6 ± 6,6	70,5 ± 10,8
	Arrières	16,9 ± 0,6	178,9 ± 3,9	78,7 ± 6,9
Casserly et al. (2019)	Arrières	U18	176 ± 7	80 ± 12
Vaz et al. (2015)	Arrières	17,8 ± 0,6	177,4 ± 3,4	78,2 ± 6,9
Lombard et al. (2015)	Arrières	18,1 ± 0,7	172 ± 5 à 182 ± 5	74 ± 10 à 88 ± 8
Wood et al. (2018)	Arrières	18,60 ± 0,60	179 ± 5	81,97 ± 7,09
Darrall-Jones et al. (2016b)	Arrières	19,3 ± 1,2	181,6 ± 4,4	87,6 ± 10,7
Casserly et al. (2019)	Arrières	U19	179 ± 6	83 ± 12
	Arrières	U20	178 ± 7	84 ± 9

Il est intéressant de noter que les données de taille et de masse rapportées par Vaz et al. (2015) chez de jeunes internationaux portugais sont inférieures à celles rapportées par Lombard et al. (2015) en Afrique du Sud au début de leur étude, soit une dizaine d'années avant l'étude portugaise. Des différences également constatées par rapport à des joueurs U19 de nations du 1^{er} tiers (Darrall-Jones et al. 2016b, Casserly et al. 2019). Ce qui met en évidence un réel décalage dans la détection (identification des talents) et le développement des joueurs entre les nations du tiers un (comme l'Afrique du Sud, l'Angleterre ou l'Irlande) et celles du tiers deux (Portugal).

Pour étayer ce constat d'une différence de taille et de masse corporelle en fonction du niveau de pratique, il semble intéressant de se pencher sur les travaux de Jones et al. (2018). Les auteurs font état qu'à âge équivalent (U18), les joueurs évoluant au plus haut niveau de compétition (niveau académie) étaient plus grands ($2,7 \pm 1,3$ %) et plus lourds ($13,3 \pm 4,1$ %) que leurs homologues évoluant à un niveau plus faible.

Les données de taille et de masse corporelle disponibles dans l'étude d'Argus et al. (2012) fournissent les indications les plus complètes sur l'évolution de ces indicateurs à travers les catégories d'âge jusqu'au niveau professionnel (niveau lycée ($16,6 \pm 0,8$ ans), académie ($19,6 \pm 1,8$ ans), semi-professionnel ($20,9 \pm 2,9$ ans), professionnel ($24,4 \pm 2,7$ ans)) (Tableaux 2.1 et 2.2). Concernant la taille, une différence modérée est observée entre les joueurs du niveau lycée et les semi-professionnels. Sinon une petite différence, voire triviale, est observée entre les catégories d'âge. Concernant la masse corporelle, une augmentation au cours des âges est relevée. Des différences modérées à larges sont observées entre les joueurs du niveau lycée et les autres catégories d'âge. Des différences petites à modérées sont observées entre les joueurs d'académies et les semi-professionnels et professionnels respectivement.

Toutes ces observations nous permettent de faire le constat d'une augmentation significative de la taille et de la masse corporelle avec le temps (Lombard et al. 2015), et qu'à l'image de leurs

homologues seniors les jeunes avants sont plus grands et plus lourds que les arrières (Lombard et al. 2015, Darrall-Jones et al. 2016b). À un âge équivalent, il a été observé des différences de taille et de masse entre les niveaux de pratique. Pour autant, chez les jeunes joueurs évoluant au plus haut niveau de leur catégorie d'âge, de très faibles différences de taille ont été observées par rapport aux professionnels (Argus et al. 2012). Phillips and Matheny (1990) ont estimé à 90% le niveau d'hérédité lié à la taille. C'est donc un facteur sur lequel on ne peut pas influencer. Il convient de prendre la taille comme un élément important dans la détection. Pour ce qui est de la masse, elle semble être l'élément qui évolue le plus avec l'âge (Argus et al. 2012, Jones et al. 2018). Elle a un rôle médiateur dans le développement de qualités physiques comme la vitesse ou la capacité énergétique (Casserly et al. 2019). Planifier et contrôler l'évolution de la masse corporelle prend tout son sens pour ne pas interférer sur le développement d'autres qualités. L'augmentation de la masse deviendra alors la résultante d'un programme d'entraînement adapté.

Il est donc important qu'une organisation comme la Fédération Française de Rugby (FFR), dans son programme de formation, suive scrupuleusement l'évolution des caractéristiques anthropologiques des joueurs au cours de leur développement. Il semble aussi intéressant d'évaluer si à l'image des travaux présentés, les joueurs internationaux ont présenté, plus jeunes, une taille et/ou une masse supérieure à celles des joueurs n'ayant pas connu de sélection internationale, et seraient ainsi un facteur discriminant à l'accès au plus haut niveau.

Points à retenir concernant les caractéristiques anthropométriques des jeunes joueurs :

- Augmentation significative de la taille et de la masse corporelle entre U16 et U20.
 - À âge équivalent, les joueurs évoluant au plus haut niveau sont plus grands et plus lourds.
 - Les avants sont plus grands et plus lourds que les arrières.
 - Le caractère héréditaire de la taille en fait un critère de détection important.
-

2.1.3. Caractéristiques physiques

Comme dans tous les sports collectifs, le joueur de rugby doit faire appel à une multitude de ressources en match. Ces ressources sont de l'ordre techniques, tactiques, physiques ou mentales. Afin de performer, le joueur devra mobiliser ces ressources de façon croisée le plus vite possible pour prendre la meilleure décision dans un espace-temps très réduit. La ressource physique, facilement quantifiable, a fait l'objet de nombreuses recherches sur son lien avec les indicateurs de performance spécifiques au rugby, comme les franchissements, les plaquages, la domination au plaquage, les essais (Gabbett 2016, Cunningham et al. 2018b). Il s'avère qu'effectivement, en fonction du poste, les qualités de force, de puissance, de vitesse ou énergétiques ont un réel impact sur ces indicateurs de performance (Cunningham et al. 2018b). Des corrélations entre la capacité à répéter les sprints et le nombre d'actions sur le terrain ont été démontrées en rugby à XV (Smart et al. 2014). Le développement de ces qualités prend alors tout son sens, ainsi que leur évaluation spécifique, standardisée et régulière.

2.1.3.1. Les qualités de force et de puissance musculaire

Par essence, dans son rapport d'opposition parfois très physique, le rugby requiert des qualités de force et de puissance élevées. Quel que soit le poste des joueurs, leurs niveaux de force et de puissance sont corrélés à des indicateurs de performance essentiels à la réussite individuelle du joueur dans son rôle sur le terrain comme le nombre de plaquages, la domination des collisions, ou encore le pourcentage de ballons portés au-delà de la ligne d'avantage (Cunningham et al. 2018b). On parle alors de la force du haut du corps, de la force du bas du corps et par extension dans sa définition, de la puissance (i.e. puissance = force x vitesse) du haut et du bas du corps.

2.1.3.1.1. L'évaluation de la force et la puissance

Pour évaluer la force de la façon la plus exacte et précise, il convient de se centrer sur le muscle ou le groupe musculaire à tester. L'utilisation d'un ergomètre isocinétique permet l'isolement souhaité en évaluant la force seulement sur un seul degré de liberté, on parle de la force maximale volontaire. Cette évaluation peut se faire de façon isométrique ou dynamique, à différentes angulations. La production de force varie en fonction de la vitesse à laquelle le muscle se raccourcit. Plus la vitesse de raccourcissement augmente et plus la force développée va diminuer (Figure 2.1). En fonction de la force produite lors du mouvement, et de la vitesse de contraction, la puissance est calculée par le produit des deux facteurs et une relation puissance-vitesse se dessine (Figure 2.1).

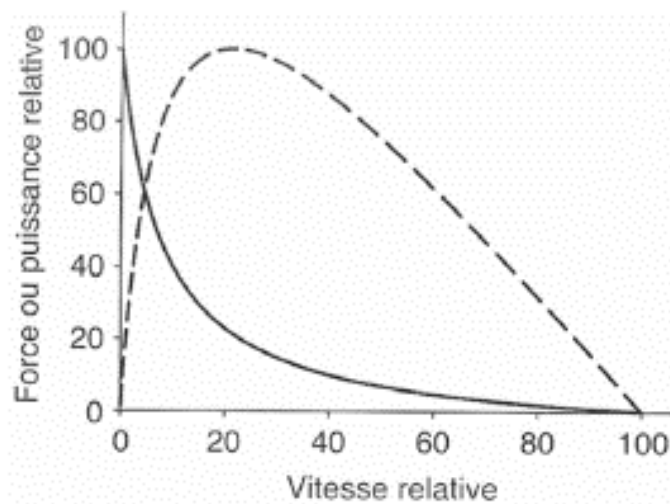


Figure 2.1 : Exemple des relations force-vitesse (courbe pleine) et puissance vitesse (courbe pointillée) (d'après les travaux de Jones et al. (2005)).

Il est possible d'extrapoler la vitesse à laquelle aucune force ne peut être produite (V_0) ainsi que la force obtenue avec une résistance ne permettant pas de déplacement, la force maximale isométrique (F_0) (Figure 2.2). Il est ensuite possible de mesurer la puissance maximale (P_{max}),

qui correspond au produit d'une vitesse optimale et d'une force optimale égalent respectivement à environ 15 à 30 % de V_0 et F_0 (Hill 1938).

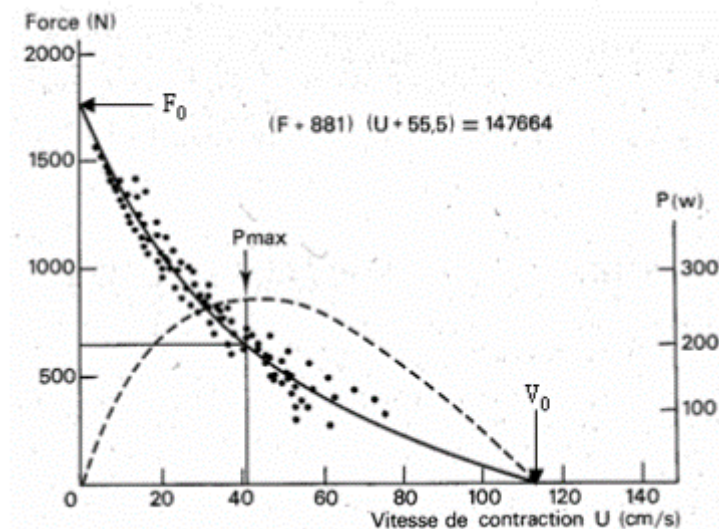


Figure 2.2 : Détermination des paramètres de V_0 , F_0 et P_{max} à partir des relations force-vitesse et puissance-vitesse (d'après les travaux de Monod and Flandrois (2003)).

Ces évaluations possibles dans des conditions contrôlées, donc très souvent de laboratoire, ne correspondent pas toujours strictement au contexte pratique de l'entraînement. Différents outils et méthodes existent pour évaluer la force et la puissance musculaire du haut et du bas du corps de façon pratique avec des mouvements polyarticulaires plus complexes qu'avec un ergomètre isocinétique (Tableau 2.3). Il a été constaté que l'évaluation de la force du haut du corps se faisait le plus souvent avec le développé couché (Argus et al. 2012, Smart et al. 2013, Vaz et al. 2014, Darrall-Jones et al. 2015, Weakley et al. 2019a). Dans plusieurs études, l'utilisation complémentaire d'une évaluation en tractions (à poids de corps ou lestées) et/ou en tirage horizontal a été observée (Smart et al. 2013, Darrall-Jones et al. 2015). Concernant la force du bas du corps, le squat semble être le mouvement de référence, on observe toutefois des variantes

entre le back squat, le box squat, le split squat ou le front squat (Argus et al. 2012, Smart et al. 2013, Vaz et al. 2014, Darrall-Jones et al. 2015, Weakley et al. 2019a). Pour tous ces mouvements dynamiques, du haut ou du bas du corps, la mesure de la force maximale se définit comme la charge maximale déplacée au moyen de trois méthodes principales : l'évaluation directe ou indirecte de la charge en répétition maximale (RM) ou l'estimation de la charge en RM. Dans le cas d'une évaluation directe, le participant devra déplacer la charge une fois et sans possibilité de le faire une fois supplémentaire, déterminant ainsi précisément son 1RM, sa force maximale. Une évaluation indirecte est possible en déplaçant x fois la charge, déterminant ainsi le xRM, exemple de l'étude de Weakley et al. (2019a), où les auteurs ont réalisé une évaluation du 3RM. L'estimation de la RM se fait en utilisant des formules permettant de retrouver le 1RM sur la base d'une charge sous maximale déplacée à plusieurs reprises (LeSuer et al. 1997). Pour cela de nombreuses équations existent.

L'avantage d'une estimation du 1RM est de ne pas mettre le participant en danger avec des charges trop lourdes. C'est ainsi très pratique sur un public plus jeune (comme les U16 ou certain U18), avec une faible maîtrise technique des mouvements, pour ne pas les mettre en contrainte extrême.

Il a également été observé l'utilisation d'évaluation isométrique sous la forme de mouvements dérivés de l'haltérophilie (comme le squat ou le tirage mi-cuisses : le mid thigh pull) (Crewther et al. 2012). Grâce à une plateforme de force placée sous le participant, la force maximale en Newton (N), ainsi que des paramètres comme la montée en force (rate of force development – RFD) peuvent être mesurés. L'utilisation d'évaluation isométrique (comme le mid thigh pull) a été démontrée comme fiable pour déterminer la force du bas du corps au lieu de méthode traditionnelle comme le 1RM au squat (Wang et al. 2016). Wang et al. (2016) ont relevé une corrélation de $r = 0,87$ entre le 1RM au squat (donc concentrique) et le pic de force isométrique chez des joueurs de rugby universitaires américains. En revanche, à la différence des

mouvements dynamiques, cette évaluation est très spécifique et moins facilement réinvestissable dans l'entraînement.

Dans le contexte pratique de l'entraînement, la mesure de la puissance s'oriente quant à elle assez souvent sur l'utilisation de sauts verticaux comme le Countermovement Jump (CMJ) ou le Squat Jump (SJ) (Argus et al. 2012, Crewther et al. 2012, Darrall-Jones et al. 2015, Weakley et al. 2019a), ou de mouvements d'haltérophilie (Smart et al. 2013). On constate que la priorité de ces évaluations de puissance est réellement portée sur le bas du corps. On parlera alors de puissance spécifique d'un saut, quel qu'il soit, et non purement de la puissance maximale telle qu'elle a été définie précédemment. Avec des évaluations en CMJ ou SJ, l'utilisation de plateforme de force ou d'encodeurs linéaires permet de fournir des données, certes sur la hauteur de saut, mais surtout sur la puissance en Watts (W). Associée à un test de saut horizontal, l'évaluation des caractéristiques de puissance du joueur devient alors plus complète. Ces tests, ne nécessitant pas d'apprentissage très long et technique, peuvent être facilement réalisés à poids de corps. L'utilisation de charges additionnelles, comme Argus et al. (2012), suppose des niveaux de force et de coordination supérieurs, étant donc moins facilement applicable chez les jeunes joueurs. Dans le même sens, l'utilisation de mouvements d'haltérophilie comme l'Épaulé (Crewther et al. 2012), contraignent à une bonne maîtrise technique de la gestuelle. C'est également un mouvement difficile à mettre en place pour une évaluation chez les jeunes.

Tableau 2.3 : Les méthodes d'évaluation de la force et de la puissance dans le rugby.

		Force			Puissance			
	Niveau	Mouvements	Nombre de répétitions	Outils	Mouvements	Nombre de répétitions	Outils	
Argus et al. (2012)	Sénior	Professionnel	DC Box Squat	1 à 4 reps	-	DC SJ	DC - 4 reps à 50% ou 60 % du 1RM SJ - 4 reps à 55% ou 60% du 1RM	DC : Smith Machine SJ : Gymaware
Crewther et al. (2012)	Sénior	Professionnel	Mid thigh pull en isométrie	2 reps de 5 sec	Plateforme de forcer	CMJ	2 reps	Plateforme de forcer
Smart et al. (2013)	Sénior	Amateur, Semi-Professionnel et Professionnel	DC Box Sq Back Sq Tractions	2 à 6 reps	-	Épaulé	2 à 6 reps	-

RM : Répétition Maximale ; Reps : Répétitions ; DC : Développé Couché ; SJ : Squat Jump ; CMJ : Countermovement Jump.

Table 2.3 : Les méthodes d'évaluation de la force et de la puissance dans le rugby (suite).

		Force			Puissance			
	Niveau	Mouvements	Nombre de répétitions	Outils	Mouvements	Nombre de répétitions	Outils	
Vaz et al. (2014)	Sénior	International (Portugais)	DC					
			Front Squat	3 à 5 reps	-	-	-	
			Leg Press					
Darrall-Jones et al. (2015)	U16 ; U18 ; U21	Académie	DC					
			Back Squat					
			Split Squat	3 RM	-	CMJ	3 reps	Plateforme de force
			Tractions					
			Tirage horizontal					
Weakley et al. (2019a)	Sénior	Semi-Professionnel	DC					
			Back Squat	3 RM	-	CMJ Broad Jump	3 reps	CMJ -Plateforme de force

RM : Répétition Maximale ; Reps : Répétitions ; DC : Développé Couché ; SJ : Squat Jump ; CMJ : Countermovement Jump.

2.1.3.1.2. L'évaluation de la force et la puissance chez les séniors

Les niveaux de force du haut et du bas du corps et de puissance des joueurs séniors élités ont bien été caractérisés et différenciés au poste dans la littérature (Argus et al. 2012, Smart et al. 2014, Brazier et al. 2020, Posthumus et al. 2020). Il a été rapporté des niveaux de force absolue, sur le haut et le bas du corps, significativement plus importants ($p \leq 0,05$) chez les avants que chez les arrières (DC 1RM : avants = $146,1 \pm 14,2$ kg vs arrières = $135,0 \pm 12,8$ kg ; squat 1RM : avants = $197,2 \pm 26,5$ kg vs arrières = $178,1 \pm 18,3$ kg) (Posthumus et al. 2020). De la même façon, des pics de puissances au CMJ significativement plus importants ($p \leq 0,05$) ont été mesurés chez les avants que les arrières (avants = $5151,8 \pm 620,5$ W vs arrières = $4512,1 \pm 451,9$ W) (Posthumus et al. 2020). Lorsque ces performances de puissance maximale sont relativisées au poids de corps des joueurs, les auteurs ne constatent plus de différence significative entre les postes (avants = $44,7 \pm 7,8$ W/kg vs arrières = $47,4 \pm 6,3$ W/kg).

L'évolution des caractéristiques de force et puissance a été étudiée sur des périodes allant de la saison sportive à plusieurs années de développement chez des joueurs de rugby professionnels (Appleby et al. 2012, Smart et al. 2013, Gannon et al. 2016). Au cours d'une saison sportive, Gannon et al. (2016) ont observé des gains de force et de puissance allant de 3% à 10,5% d'augmentation chez des joueurs professionnels (Gannon et al. 2016). Les auteurs affirment qu'environ une à deux sessions d'entraînement en force et puissance sur le bas du corps suffiraient à induire ces adaptations malgré la charge d'entraînement de rugby associée. Sur une période de développement de deux ans, Appleby et al. (2012) ont mesuré chez des joueurs professionnels une amélioration de la force maximale en développé couché et de la force maximale en squat de 11,5% et 10,8% respectivement (Appleby et al. 2012). Les auteurs indiquent que respectivement 51% et 46% de l'amélioration de la force maximale du haut et du bas du corps observée dans la deuxième année sont dues aux niveaux de force initiaux. Mettant ainsi en évidence qu'un développement significatif de la force, et donc de la puissance, est

possible même chez des joueurs professionnels. Pour finir, Smart et al. (2013) ont évalué les évolutions possibles de la force et de la puissance de joueurs professionnels sur une période de quatre ans (Smart et al. 2013). Ils ont observé une augmentation moyenne annuelle de la force du haut et du bas du corps de 4,6 % et 12,5 % respectivement chez les avants, et de 5,7 % et 10,3 % chez les arrières. La puissance évaluée au moyen d'un épaulé-jeté n'a mis en évidence d'évolution significative chez les joueurs (Smart et al. 2013).

Il a été démontré que chez les avants les performances au CMJ et au Drop Jump (DJ), donc reliées à la puissance des joueurs, étaient associées au nombre de placages ($r : 0,64$), au pourcentage de ballon porté par le joueur au-delà de la ligne d'avantage ($r : 0,73$), sa domination lors des collisions ($r : 0,60$) ou encore son efficacité à être au soutien lors de phase de rassemblement après franchissement en attaque ($r : 0,65$) (Cunningham et al. 2018b). De la même façon, chez les arrières, les performances aux tests de puissance ont été corrélées à la domination du joueur au contact ($r : 0,79$), et à des actions plus spécifiques comme les franchissements ($r : 0,62$) et le nombre d'essais marqués ($r : 0,64$). Un test de force isométrique au mid thigh pull a été corrélé à l'efficacité à être au soutien lors de phase de rassemblement après franchissement en attaque ($r : 0,63$), au nombre de passes après contact ($r : 0,62$) ou encore à la réussite au placage ($r : 0,60$) chez les arrières (Cunningham et al. 2018b). Dans cette étude, les mesures de force chez les avants n'ont montré aucune corrélation avec les indicateurs de performance étudiés.

2.1.3.1.3. L'évaluation de la force et la puissance chez les jeunes

À l'instar de leurs aînés, les qualités de force et de puissance des jeunes joueurs sont essentielles pour dominer leurs adversaires, surtout dans les phases de combat. Les premières études présentant des données de force ou de puissance ne sont apparues que tardivement par rapport aux séniors. Argus et al. (2012) ont fait partis des premiers auteurs à rapporter des données de

1RM en DC et en box squat chez des jeunes joueurs australiens. C'est dans une étude comparative sur plusieurs catégories d'âges qu'ils se sont intéressés à des jeunes lycéens U18 ($16,6 \pm 0,8$ ans) et des joueurs U21 d'académie ($19,6 \pm 1,8$ ans). Les joueurs d'académie (115 ± 16 kg) étaient $25,7 \pm 7,8$ % plus forts que les U18 (85 ± 13 kg) au développé couché et $33,9 \pm 12,0$ % plus forts au squat (U21, 151 ± 30 kg vs U18, 100 ± 19 kg). Dans cette même étude, les joueurs professionnels et semi-professionnels testés étaient $18,9 \pm 5,9$ % et $14,7 \pm 6,5$ % plus forts au DC, et $18,3 \pm 9,2$ % et $17,7 \pm 10,3$ % plus forts au box squat que les U21 (Argus et al. 2012), mettant en évidence l'importance d'augmenter les niveaux de force maximale avec les niveaux de jeu et l'âge. Les premières données de force et de puissance chez des jeunes d'académies de clubs professionnels ont été apportées par Darrall-Jones et al. (2015). Dans cette étude comparative entre des U18 et des U21, les données de force maximale du haut du corps (DC) ont révélés une très large augmentation avec l'âge (U18, $82,6 \pm 10,8$ kg vs U21, $108,2 \pm 14,1$ kg). De la même façon, les auteurs rapportent une très large augmentation de la force du bas du corps (front squat) entre les U18 et les U21 (U18, $88,6 \pm 10,8$ kg vs U21, $118,2 \pm 17,8$ kg). Il est à retenir des résultats de Darrall-Jones et al. (2015), que sur toutes les évaluations de force dynamique ou isométrique (mid tight pull), la force absolue et relativisée au poids de corps augmente de façon significative avec l'âge. Le constat est le même pour l'évaluation de la puissance en CMJ, puisqu'ils observent une augmentation de la hauteur de saut et du pic de puissance entre les U18 et les U21 ($39,5 \pm 6,1$ cm vs $47,1 \pm 3,6$ cm ; 4561 ± 641 W vs 5219 ± 606 W respectivement). Les auteurs soutiennent l'hypothèse que ces améliorations de hauteur de saut et de pic de puissance sont dues au processus de croissance et de maturation et également au stimulus fourni par les programmes d'entraînement en force des joueurs plus âgés augmentant ainsi les niveaux de force maximale (Baker 2002, Darrall-Jones et al. 2015)

L'un des éléments à prendre en compte quand on traite d'un public débutant (adultes ou jeunes), et d'autant plus quand on parle de la force, c'est son expérience dans la pratique de l'entraînement en force. Weakley et al. (2017) se sont proposés d'évaluer l'impact de l'expérience de l'entraînement en force en comparant les niveaux de force en front squat, DC et tractions chez des jeunes joueurs dits expérimentés ($17,3 \pm 0,4$ ans pour $2,7 \pm 0,2$ ans d'expérience de l'entraînement en force) et des jeunes joueurs non expérimentés ($16,7 \pm 0,3$ ans pour $0,9 \pm 0,2$ ans d'expérience de l'entraînement en force). Les données de 3RM au DC relevées chez les U18 expérimentés sont supérieures à celles des non expérimentés ($92,1 \pm 16,5$ kg vs $73,2 \pm 15,7$ kg respectivement) et également supérieures au 3RM enregistré par Darrall-Jones et al. (2015) sur la même catégorie d'âge ($82,6 \text{ kg} \pm 10,8 \text{ kg}$). Un constat identique sur l'évaluation en traction entre les expérimentés et les non expérimentés ($103,7 \pm 14,7$ kg vs $95,0 \pm 13,0$ kg respectivement). Des données pour les joueurs expérimentés similaires aux données précédemment relevées chez des U18 (Darrall-Jones et al. 2015, Jones et al. 2018). Pour terminer, les données de 3RM en front squat montrent une nouvelle fois que les joueurs expérimentés sont plus forts que leurs homologues non expérimentés ($103,0 \pm 17,4$ kg vs $87,5 \pm 12,8$ kg respectivement). Les données de 3RM en front squat précédemment rapportées dans la littérature se rapprochant davantage des joueurs avec l'expérience la plus faible ($88,6 \pm 10,8$ kg (Darrall-Jones et al. 2015)), montrent bien l'importance de l'expérience et les apports de l'entraînement en force.

Lombard et al. (2015) ont réalisé une étude prospective de l'évolution physique des joueurs élités U20 sur 13 années (1998-2010). Ils se sont centrés sur deux évaluations de force, le DC (1RM) et les tractions (maximum de répétitions à poids de corps). Les résultats révèlent, comme chez les séniors, une force absolue plus grande chez les avants que les arrières, environ 18% supérieure, mais une force relative environ 10% supérieure chez les arrières. Les données les plus récentes (2010) de 1RM au DC évaluent les avants à 138 ± 23 kg et les arrières à 130 ± 20

kg. Les arrières voient une progression plus importante (+51%) entre 1998 et 2010 que les avants (+32%). Les auteurs ont également fait le choix d'évaluer la capacité des joueurs sur un maximum de tractions, comme Vaz et al. (2015). Sur les 13 ans analysés, les arrières réalisent significativement plus de tractions que les avants (14 ± 6 répétitions vs 11 ± 4 répétitions respectivement). Une performance supérieure des arrières en partie expliquée par les auteurs, par une masse supérieure des avants, devenant ainsi un handicap (Lombard et al. 2015). Tous postes confondus, les joueurs ont augmenté de 10 ± 4 répétitions en 1998 à 15 ± 6 répétitions en 2010. Des résultats meilleurs que ceux rapportés par Vaz et al. (2015) chez des U19 portugais (avants : $6,0 \pm 4,0$ répétitions ; arrières : $8,5 \pm 3,4$ répétitions).

Il a également été constaté chez des joueurs U18 évoluant à des niveaux de pratique différents, que les joueurs jouant au plus haut niveau étaient plus forts du haut et du bas du corps lors d'une évaluation en 3RM tractions (plus la masse corporelle) ($+6,6 \pm 4,5$ %) et en 3RM au squat ($+30,5 \pm 7,9$ %).

Les qualités de force et de puissance ayant ainsi un rôle majeur et discriminant dans le développement des joueurs de rugby, ce sont des paramètres à régulièrement évaluer tout au long son parcours.

Points à retenir concernant les caractéristiques de force et de puissance des jeunes joueurs :

- Augmentation significative de la force et de la puissance entre U18 et U20, et jusqu'à au niveau sénior.
 - À âge équivalent, les joueurs évoluant au plus haut niveau sont plus forts et plus puissants.
 - Les avants sont plus forts et plus puissants que les arrières.
 - Place prioritaire du développement de la force et de la puissance chez les jeunes joueurs.
-

2.1.3.2. Les qualités de vitesse

2.1.3.2.1. L'évaluation de la vitesse

La vitesse peut être évaluée selon différentes modalités (en ligne droite ou en changement de direction) et suivant une multitude de protocoles (Tableau 2.4). Quand on parle d'évaluation de la vitesse, on constate dans la littérature que la grande majorité des études traitent de la variable de temps pour parcourir des distances en ligne droite allant de 5 mètres (m) à 60 m. Pour mesurer ce temps, la plupart des études répertoriées utilisent un système de portes de cellules photoélectriques, il a également été observé l'utilisation d'un radar (Cross et al. 2015). D'autres paramètres comme la vitesse en mètres par seconde ($m.s^{-1}$), mesurée en divisant la distance entre deux portes et le temps pour la parcourir, l'accélération ($m.s^{-2}$), mesurée en divisant la variation de vitesse par la variation de temps entre deux portes, ou encore le momentum ($kg.m.s^{-1}$), mesuré en multipliant la vitesse entre deux portes avec la masse corporelle et témoin de la quantité de mouvement déplacée, ont été rapportés.

Des évaluations de vitesse non linéaires sont également répertoriées, pour juger de la capacité de changement de direction. Plusieurs types d'évaluations ont été observées : soit l'évaluation sous forme d'aller-retour (Darrall-Jones et al. 2015, Kobal et al. 2016, Chiwaridzo et al. 2019), soit une évaluation de course en courbe (Condello et al. 2013, Kobal et al. 2016), ou un mixte des deux avec l'Illinois agility test (Vaz et al. 2015). Malgré tout, on constate une multitude de tests différents, utilisant des méthodologies différentes (distance, demi-tour ou course en courbe ...), rendant donc les comparaisons difficiles.

Tableau 2.4 : Les méthodes d'évaluation de la vitesse dans le rugby.

Référence	Niveau	Évaluation de la capacité de vitesse linéaire			Évaluation de la capacité de changement de direction		
		Distances (m)	Paramètre(s) mesuré(s)	Outil	Test	Paramètre(s) mesuré(s)	Outil
Condello et al. (2013)	U9 à U19	15	Temps (s)	Cellules Photoélectriques	Zig Zag 15m	Temps (s)	Cellules Photoélectriques
Smart and Gill (2013)	U14 – U16 – U18	10 – 20 – 30 – 60	Temps (s)	Cellules Photoélectriques	-	-	-
Darrall-Jones et al. (2015)	U16 – U18 – U21	5 – 10 – 20 - 40	Temps (s) – Momentum (kg.m.s ⁻¹) – Vitesse (m.s ⁻¹) – Accélération (m.s ⁻²)	Cellules Photoélectriques	Agility 505	Temps (s)	Cellules Photoélectriques
Vaz et al. (2015)	U19	10 – 20 – 40 – 50	Temps (s)	Cellules Photoélectriques	Illinois agility test	Temps (s)	Chronomètre

Tableau 2.4 : Les méthodes d'évaluation de la vitesse dans le rugby (suite).

Référence	Niveau	Évaluation de la capacité de vitesse linéaire			Évaluation de la capacité de changement de direction		
		Distances (m)	Paramètre(s) mesuré(s)	Outil	Test	Paramètre(s) mesuré(s)	Outil
Darrall-Jones et al. (2016b)	U16 – U18 –	5 – 10 – 20 -	Momentum (kg.m.s ⁻¹)	Cellules	-	-	-
	U21	40	– Vitesse (m.s ⁻¹) – Accélération (m.s ⁻²)	Photoélectriques			
Kobal et al. (2016)	U15 – U17 –						Cellules
	U19 –				COD_45°	Temps (s)	Photoélectriques
	Professionnel	10 – 20 – 40	Temps (s)	Cellules Photoélectriques			Cellules
	– International				Pro Agility Test	Temps (s)	Photoélectriques
Chiwaridzo et al. (2019)	U16	10 – 20 – 40	Temps (s)	Cellules Photoélectriques	L-run test	Temps (s)	Cellules Photoélectriques

2.1.3.2.2. L'évaluation de la vitesse chez les séniors

Smart et al. (2013), grâce à leurs travaux, donnent un état des lieux précis des différences de performance en sprint à différents niveaux de pratique. Pour autant, dans leur étude, les données brutes qu'ils fournissent concernent l'ensemble de leur cohorte de joueurs, un mixte entre des amateurs, des semi-professionnels et des professionnels. Ils mettent en évidence que les avants internationaux sont plus rapides que les joueurs évoluant dans le championnat professionnel ($-1,9 \pm 2,1$ %) ou dans les provinces, niveau inférieur ($-2,1 \pm 2,2$ %) sur 20 m. Chez les arrières, Smart et al. (2013) observent que les internationaux sont plus rapides que les arrières évoluant à plus faible niveau sur 10, 20 et 30 m de sprint. De plus, leur analyse comparative des postes montre que les joueurs du troisième rideau (ailiers et arrières) ont les temps au sprint les plus courts sur 10, 20 et 30 m. Les différences entre les joueurs du troisième rideau et les autres postes allaient de petites (0,02 seconde avec les centres sur 10 m) à très grandes (0,32 seconde avec les piliers sur 20 m). Les tendances montrent une diminution linéaire du temps au sprint au fur et à mesure que le numéro de poste augmente (du pilier droit avec le numéro 1, jusqu'aux joueurs du troisième rideau) (Smart et al. 2013).

Vaz et al. (2014) ont comparé les temps au sprint d'avants internationaux portugais avec des arrières internationaux portugais. Ils n'ont constaté aucune différence significative entre les deux groupes de postes sur des distances allant de 10 à 50 m. La forte hétérogénéité des profils dans les groupes de postes « avants » et « arrières » peut sans doute expliquer ce manque de différence. Contrairement à Smart et al. (2013) qui avaient observé des différences de 4,9 % et 4,8 % sur les temps au 10 m et 20 m entre les piliers et les troisièmes lignes respectivement. Ces variations au sein même d'un groupe de poste mettent en évidence que la combinaison des avants et des arrières peut masquer les différences et que la comparaison en utilisant une équipe complète, ou même les groupes de postes dans certains cas (Vaz et al. 2014), peut être inefficace pour fournir des données comparatives.

Les travaux de Cross et al. (2015) donnent accès aux données de vitesse des internationaux néozélandais, de riches informations à la vue de la constante domination de cette équipe depuis plusieurs décennies. Pour autant, les données sur 10 et 20 m que les auteurs rapportent semblent plus faibles (temps plus important) que celles rapportées par leurs homologues anglo-saxons Cunningham et al. (2013) et Bradley et al. (2015). Ces différences sont probablement dues à une différence méthodologique majeure dans le choix des outils d'évaluation, cellules photoélectriques (Cunningham et al. 2013, Bradley et al. 2015) ou radar (Cross et al. 2015).

En plus des temps au sprint, Cross et al. (2015) ont adopté la méthodologie d'analyse de Samozino et al. (2016), évaluant ainsi les paramètres du profil force-vitesse, évalués lors d'un sprint, suivants : la force maximale théorique (F_0), la vitesse maximale théorique (V_0) et la puissance maximale (P_{max}). Comme évoqué dans la partie sur l'évaluation de la force et de la puissance (2.1.3.1.1.), le niveau de force produit dépend de la vitesse du mouvement. Ceci est valable pour des mouvements simples de contraction d'un muscle ou des mouvements complexes polyarticulaires (un saut, un sprint...). Dans le cas d'un sprint, établir le profil force-vitesse ou le spectre force-vitesse, consiste à quantifier la force produite à toutes les vitesses possibles, c'est-à-dire depuis une vitesse nulle (au départ) jusqu'à la vitesse la plus élevée (vitesse maximale (V_{max})). Samozino et al. (2016) ont mis en place une méthode qui permet de recalculer la force produite par l'athlète en fonction de sa vitesse de course. L'utilisation du radar dans cette méthodologie est particulièrement fastidieuse, surtout quand il s'agit d'évaluer un groupe d'une trentaine de joueurs sur deux passages. C'est pourquoi l'utilisation de l'outil GPS pour évaluer les caractéristiques de sprint commence à émerger (Clavel et al. 2022).

De nombreux liens entre la performance en match et les performances de vitesse ont été établis (Smart et al. 2014, Cunningham et al. 2018b). Il a été démontré chez les avants, que les performances de vitesse sur des sprints de 10 et 20 m seraient corrélées au nombre de franchissements, au nombre de placages « cassés » (réussir offensivement à dominer la collision et se sortir du placage), au nombre de mètres parcourus avec le ballon, au nombre

d'essais marqués, au nombre d'évitements, à la capacité à être l'un des trois premiers soutiens aux rucks offensifs, ou encore du nombre de ballons portés après la ligne davantage (Smart et al. 2014, Cunningham et al. 2018b). Du côté des arrières, les temps au sprint sur 10 et 30 m seraient corrélées au nombre de franchissement, au nombre de placages cassés, au nombre de mètres parcourus avec le ballon, au nombre d'essais marqués, au nombre d'évitements, à la capacité à être l'un des trois premiers soutiens aux rucks offensifs et défensifs (Smart et al. 2014). Aussi, Cunningham et al. (2018b) rapportent que le momentum mesuré sur 10 m chez les arrières est corrélé à la domination lors des collisions ainsi qu'à la capacité de réaliser des passes après contact.

À la lecture de ces informations, il semble pertinent de s'intéresser à la population des jeunes joueurs pour comprendre l'évolution des paramètres de la vitesse au cours de leur développement, et évaluer si à l'image des séniors des différences existent entre les groupes de postes ou les niveaux de pratique.

2.1.3.2.3. L'évaluation de la vitesse chez les jeunes

La littérature traitant des qualités de vitesse chez les jeunes joueurs de rugby donne accès à un éventail de données hétérogènes (Tableau 2.5). On trouve des données sur des jeunes de U14 à U20 (Smart and Gill 2013, Lombard et al. 2015), des jeunes U20 internationaux canadiens (Barr et al. 2014) et portugais (Vaz et al. 2015), ou d'un haut niveau national (Darrall-Jones et al. 2015, Lombard et al. 2015, Darrall-Jones et al. 2016b, Jones et al. 2018). Comme évoqué précédemment, les données rapportées par Smart and Gill (2013) ayant été regroupées sur la base de trois générations d'âge (U14, U16 et U18) n'ont pas valeur à être comparées avec celles du reste de la littérature. Pour rappel, cette étude n'avait pas pour objectif de fournir des données normatives par catégorie d'âge, mais bien d'évaluer la différence de l'effet d'un programme d'intersaison sur un groupe supervisé et un groupe en autonomie.

Tableau 2.5 : Études présentant les caractéristiques de vitesse des jeunes joueurs de rugby à différentes catégories d'âge.

Référence	Poste	Âge (ans)	5 m (s)	10 m (s)	20 m (s)	40 m (s)	50 m (s)
Chiwariidzo et al. (2019)	Tous les postes	14,9 ± 0,31		2,19 ± 0,14	3,50 ± 0,22	6,14 ± 0,46	
		15,5 ± 0,3	1,05 ± 0,09	1,82 ± 0,12	3,10 ± 0,19	5,66 ± 0,37	
Darrall-Jones et al. (2015)	Tous les postes	16,9 ± 0,5	1,06 ± 0,04	1,81 ± 0,06	3,09 ± 0,12	5,51 ± 0,24	
		19,0 ± 1,1	1,07 ± 0,07	1,79 ± 0,10	3,07 ± 0,13	5,43 ± 0,21	
Lombard et al. (2015)	Tous les postes	U20		De 1,86 ± 0,10 à		De 5,44 ± 0,20 à	
				1,73 ± 0,10		5,23 ± 0,30	

Tableau 2.5 : Études présentant les caractéristiques de vitesse des jeunes joueurs de rugby à différentes catégories d'âge (suite).

Référence	Poste	Âge (ans)	5 m (s)	10 m (s)	20 m (s)	40 m (s)	50 m (s)
Darrall-Jones et al. (2016b)	Avants	15,4 ± 0,3	1,09 ± 0,11	1,88 ± 0,12	3,21 ± 0,18	5,87 ± 0,30	
	Avants	16,9 ± 0,5	1,07 ± 0,05	1,84 ± 0,06	3,14 ± 0,10	5,63 ± 0,21	
Casserly et al. (2019)	Avants	U18		1,74 ± 0,07			
Vaz et al. (2015)	Avants	18,0 ± 0,5			3,12 ± 0,12		7,08 ± 0,21
Darrall-Jones et al. (2016b)	Avants	18,9 ± 0,9	1,09 ± 0,07	1,82 ± 0,10	3,12 ± 0,11	5,52 ± 0,17	
	Avants	U19		1,77 ± 0,06			
Casserly et al. (2019)	Avants	U20		1,77 ± 0,06			

Tableau 2.5 : Études présentant les caractéristiques de vitesse des jeunes joueurs de rugby à différentes catégories d'âge (suite).

Référence	Poste	Âge (ans)	5 m (s)	10 m (s)	20 m (s)	40 m (s)	50 m (s)
Darrall-Jones et al. (2016b)	Arrières	15,6 ± 0,2	1,01 ± 0,05	1,77 ± 0,08	2,99 ± 0,15	5,45 ± 0,31	
	Arrières	16,9 ± 0,6	1,05 ± 0,04	1,79 ± 0,06	3,02 ± 0,10	5,34 ± 0,17	
Casserly et al. (2019)	Arrières	U18		1,65 ± 0,03			
Vaz et al. (2015)	Arrières	17,8 ± 0,6			2,96 ± 0,10		6,86 ± 0,20
Darrall-Jones et al. (2016b)	Arrières	19,3 ± 1,2	1,05 ± 0,07	1,76 ± 0,12	3,02 ± 0,15	5,32 ± 0,22	
Casserly et al. (2019)	Arrières	U19		1,67 ± 0,03			
	Arrières	U20		1,64 ± 0,02			

À l'image des performances de sprint présentées chez les séniors, les jeunes arrières sont plus rapides sur courtes distances (10 m) (Darrall-Jones et al. 2016b, Wood et al. 2018, Casserly et al. 2019) et plus longues distances (40 – 50 m) (Lombard et al. 2015, Vaz et al. 2015, Darrall-Jones et al. 2016b) que les avants. De plus, Barr et al. (2014) ont montré des vitesses maximales supérieures chez les arrières que chez les avants ($9,07 \pm 0,33 \text{ m.s}^{-1}$ contre $8,40 \pm 0,57 \text{ m.s}^{-1}$). En revanche, ces mêmes auteurs relèvent que la quantité de mouvement mesurée sur 10 m (momentum) est supérieure chez les avants que chez les arrières ($555 \pm 40 \text{ kg.m.s}^{-1}$ contre $486 \pm 44 \text{ kg.m.s}^{-1}$). Le momentum mesuré entre 30 et 40 m est également supérieur chez les avants que chez les arrières ($845 \pm 47 \text{ kg.m.s}^{-1}$ contre $758 \pm 60 \text{ kg.m.s}^{-1}$). Ces résultats sont le reflet des différences observées dans les exigences du jeu entre les avants et les arrières (Roberts et al. 2008, Cahill et al. 2013). La plus grande masse corporelle des avants devient alors bénéfique pour ces joueurs d'avantage sollicités dans des actions de contact (avec une faible vitesse, dans des petits espaces). Et une meilleure vitesse maximale fera la différence chez les arrières, plutôt sollicités sur des courses dans de larges espaces.

L'étude de Darrall-Jones et al. (2015) a proposé une analyse comparative entre des joueurs U16, U18 et U21 sur la base de sprints de 40 m avec pour intermédiaires 5 m, 10 m et 20 m. Ils ne constatent pas de différence significative dans les temps au sprint entre les catégories. Cependant, les vitesses moyennes mesurées entre les portes ont identifié les U16 comme plus lents que les U21 entre 5-10 m. Constat identique entre 20-40 m, les auteurs ont mesuré des vitesses inférieures chez les U16 que chez les U18 et les U21. De plus, le momentum mesuré chez les U16 était significativement plus faible que chez les U18 et U21 sur toutes les distances. Le momentum mesuré chez les U18 était significativement plus faible que chez les U21 entre 5-10 m et 20-40 m. Pour finir, les auteurs ont analysé l'évolution de l'accélération au cours du sprint. Ils observent une large réduction de l'accélération entre 5-10 m entre les U16 et les U21, alors qu'une augmentation est observée entre 10-20 m. Entre 20-40 m, les U16 commencent à

décélérer ($-0,04 \text{ m.s}^{-2}$), des différences modérées à larges par rapport aux U18 et aux U21 respectivement, sont alors observées. Une accélération plus faible a été observée chez les U18 par rapport aux U21 entre 20-40 m. Cela démontre que les plus jeunes joueurs (U16) atteignent plus rapidement leur vitesse maximale, mais sont incapables de la maintenir au-delà de 20 m. Alors que les joueurs plus âgés (U18 et U21) ont pu atteindre une vitesse maximale plus élevée tout en maintenant cette vitesse pendant plus longtemps, signe d'une plus grande endurance à la vitesse. Ces résultats suggèrent ainsi d'orienter l'entraînement des U16 vers du sprint maximal pour améliorer leur vitesse maximale afin de mieux se préparer aux exigences de la catégorie U18 (Darrall-Jones et al. 2015)

Dans une autre étude, Darrall-Jones et al. (2016b) ajoutent à leurs comparaisons U16, U18, U21 les groupes de poste avants et arrières permettant une analyse plus fine des comportements au sprint. Comme dans leurs précédents résultats (Darrall-Jones et al. 2015), les temps au sprint mesurés n'ont montré aucune différence entre les catégories d'âge. Les comparaisons n'étaient pas claires à l'exception du 40 m chez les avants et du 5 m pour les arrières, plus rapides chez les U16 que les U18. Les vitesses moyennes mesurées montrent que les avants étaient plus rapides dans les groupes d'âge consécutifs entre 5-10 m et 20-40 m. La vitesse de sprint des arrières U16 était plus élevée entre 0-5 m et plus faible entre 20-40 m par rapport aux U18. Ceci suggère que la vitesse maximale est susceptible d'augmenter avec l'âge, peu importe le poste. Les auteurs, s'appuyant sur les travaux de Barr et al. (2014) suggèrent ainsi une fenêtre d'adaptation pour la vitesse de sprint à la fin de l'adolescence, avant la vingtaine (Barr et al. 2014, Darrall-Jones et al. 2016b).

Jones et al. (2018) se sont attachés à proposer une analyse comparant les profils physiques de jeunes joueurs U18 évoluant au niveau académie, le meilleur niveau de la catégorie, ou au niveau de joueur évoluant à un niveau scolaire, un niveau inférieur. Ils ne constatent aucune différence sur les temps au sprint au 10 m entre les deux niveaux. Seulement une petite

différence sur 20 et 40 m a été relevée, avec les joueurs du plus haut niveau plus rapides. Pour autant, la combinaison de la masse corporelle et des qualités de vitesse font que les joueurs d'académie ont un momentum sur 10 m plus important que leurs homologues du niveau scolaire. À la différence du temps au sprint, le momentum serait un facteur de discrimination entre les niveaux de pratique (Jones et al. 2018), comme pour les catégories d'âge (Darrall-Jones et al. 2015).

Bien que Barr et al. (2014) aient proposé une prospection des qualités de vitesse des internationaux U20 canadiens, les paramètres qu'ils analysent (vitesse et momentum) ne sont pas comparables aux temps au sprint fournis par Lombard et al. (2015) et Vaz et al. (2015) chez des U20 sud-africains et portugais respectivement. Les temps de sprint sur 20 m rapportés par Vaz et al. (2015) sont similaires à ceux de joueurs séniors (Smart et al. 2013) aussi bien chez les avants (avants portugais : $3,12 \pm 0,12$ s ; avants séniors : entre 3,06 et 3,21 s), que chez les arrières (arrières portugais : $2,96 \pm 0,10$ s ; arrières séniors : entre 2,89 et 2,96 s).

Pour finir, Chiwaridzo et al. (2019) ont rapporté des temps au sprint chez de jeunes joueurs U15. Les données qu'ils observent à 10 m, 20 m, et 40 m sont inférieures à celles relevées chez des joueurs U16 (Darrall-Jones et al. 2015) (10 m : U15 = $2,19 \pm 0,14$ s vs U16 = $1,82 \pm 0,12$ s ; 20 m : $3,50 \pm 0,22$ s vs $3,10 \pm 0,19$ s ; 40 m : $6,14 \pm 0,46$ s vs $5,66 \pm 0,37$ s). Une réelle progression est donc observée entre les catégories U15 et U16.

Les différents paramètres de la vitesse, courte ou longue, pouvant discriminer les joueurs par leur âge ou leur poste ou leur niveau de pratique (Barr et al. 2014, Darrall-Jones et al. 2015, Lombard et al. 2015, Vaz et al. 2015, Darrall-Jones et al. 2016b, Jones et al. 2018), il semble primordial de régulièrement tester les joueurs tout au long de leur parcours de formation.

Points à retenir concernant les caractéristiques de vitesse des jeunes joueurs :

- Très peu d'évolution du temps aux sprints entre U16 et U20, sur courte et longue distance.
 - À âge équivalent, aucun effet du niveau de pratique sur les performances sur vitesse courte, mais des performances un peu meilleures sur 20 ou 40 m pour les joueurs évoluant au plus haut niveau.
 - Les arrières sont plus rapides que les avants.
-

2.1.3.3. Les qualités énergétiques

2.1.3.3.1. Les différentes méthodes d'évaluation

Alors que les données décrivant les mesures de force, de puissance et de vitesse (Quarrie and Hopkins 2007, Argus et al. 2012, Crewther et al. 2012, Smart et al. 2013, Barr et al. 2014, Vaz et al. 2014) sont disponibles et permettent une comparaison entre le niveau de pratique (professionnel vs amateur) ou le poste, il y a un manque de recherche déterminant les capacités énergétiques des joueurs de rugby à XV depuis la professionnalisation du sport (O'Gorman et al. 2000, Scott et al. 2003). Des données concernant la capacité aérobie sont disponibles avant la professionnalisation (Bell 1973, Reid and Williams 1974, Bell 1980), mais on pourrait logiquement affirmer qu'elles ne devraient pas être utilisées pour la comparaison en raison du développement accéléré des caractéristiques anthropométriques et physiques depuis l'apparition du professionnalisme en 1995 (Quarrie and Hopkins 2007, Sedeaud et al. 2013).

Des valeurs de $VO_2\text{max}$ de joueurs de rugby internationaux ont été rapportées par O'Gorman et al. (2000). Les auteurs ont évalué leurs $VO_2\text{max}$ à $54,1 \text{ ml.kg.min}^{-1}$, tandis que Scott et al. (2003) rapportent des $VO_2\text{max}$ significativement différentes ($p < 0,05$) entre les avants ($41.2 \pm 2,7 \text{ ml.kg.min}^{-1}$) et les arrières ($48.3 \pm 2,1 \text{ ml.kg.min}^{-1}$) d'une équipe professionnelle de rugby de première division. Bien que ces données décrivent la capacité aérobie maximale des joueurs professionnels de rugby, elles peuvent être moins utiles pour comprendre la capacité des joueurs à courir à haute intensité, comme lors d'un match ou d'un entraînement.

En utilisant la "vitesse maximale aérobie" (VMA), vitesse suffisante pour atteindre la $VO_2\text{max}$ (Leger and Boucher 1980), il est possible d'intégrer la capacité aérobie maximale comme une vitesse de référence à utiliser dans la prescription d'entraînement (Billat et al. 1995, Buchheit and Laursen 2013). Ainsi, l'évaluation de la $VO_2\text{max}$ grâce à la méthode de mesure des échanges gazeux pulmonaires directement recueillis pendant un protocole de course sur tapis roulant au cours duquel la vitesse est incrémentée est la méthode de référence pour déterminer la VMA (Billat et al. 1994). Des tests de terrain sont également utilisés pour déterminer la VMA. Swaby et al. (2016) ont proposé une estimation de la VMA de joueurs de rugby à XV professionnels avec un test de contre la montre sur une distance de 1200-m. La VMA était calculée en divisant la distance totale de course (1200-m) par le temps pour la parcourir. On peut également citer le test sur piste de l'Université de Montréal réalisé sur une piste de 400 m, avec des marqueurs tous les 50 m, les participants doivent maintenir une vitesse de course en fonction d'un signal sonore, le test se terminant lorsque deux marqueurs consécutifs sont manqués (Leger and Boucher 1980). Le test présente des corrélations extrêmement importantes ($r = 0,96$) avec la $VO_2\text{max}$. Une forme hybride de test sur piste est proposée par George Cazorla (Cazorla 1990), le Test de l'Université de Bordeaux 2 (le TUB II). Un enchaînement de courses sur trois minutes, espacées d'une minute de récupération. Le fait de s'arrêter et de repartir semblerait correspondre un peu plus à ce que peuvent vivre des athlètes de sports collectifs même si l'on est encore assez éloigné du caractère intermittent et aux multiples changements de direction qu'ils peuvent vivre en match. Il est suggéré que dans les sports collectifs, l'aptitude aérobie des joueurs soit évaluée au moyen de tests de navette, car les contraintes d'accélération et de décélération sont plus similaires aux exigences du sport (Duthie et al. 2003), contrairement aux évaluations à vitesse continue.

L'évaluation au moyen de courses en navettes comprend entre autres le test de navettes de Leger (Leger and Lambert 1982), le Yo-Yo intermittent recovery 1 (Yo-Yo IR1) test (Bangsbo et al.

2008) et le 30-15 Intermittent Fitness Test (30-15IFT) (Buchheit 2008). Le test de navettes de Leger consiste en un enchaînement d'allers-retours de 2 x 20 m à des vitesses incrémentées de 0,5 km.h⁻¹ toutes les deux minutes, et une vitesse initiale de 7,5 km.h⁻¹, le joueur doit alors réaliser un maximum de navette tout en respectant un signal sonore pour faire respecter la vitesse des paliers. Le Yo-Yo IR1 test consiste en une répétition de navettes de 2 x 20 m avec une phase de récupération active (marche ou course lente) sur un aller-retour de 2 x 5 m sur 10 secondes entre chaque répétition. Un signe sonore permet de contrôler la vitesse progressivement incrémentée au cours du test, le test démarre à 10 km.h⁻¹. Pour finir, le 30-15IFT un test d'enchaînement de navettes de 30 secondes entrecoupées de 15 secondes de récupération passive en marche. Une bande sonore permet également dans ce test de réguler la vitesse, qui commence à 8 km.h⁻¹ et augmente de 0,5 km.h⁻¹ à chaque palier. Tous ces tests de navettes démontrent des relations importantes à extrêmement importantes avec la VO₂max (Test Leger r = 0,92 (Ramsbottom et al. 1988), le Yo-Yo IR1 test r = 0,70 (Bangsbo et al. 2008), 30-15IFT r = 0,63 (Buchheit 2008)). Bien qu'aucune autre évaluation que l'évaluation directe avec échanges gazeux ne puisse mesurer la VO₂max, on peut malgré tout affirmer que ces tests semblent fournir des informations pertinentes sur les capacités aérobies des joueurs.

Le Yo-Yo IR1 test a montré de fortes corrélations avec un nombre important et une efficacité élevée d'actions spécifiques rugby (placages, passes, rapidité de présence aux rucks offensifs et défensifs, ballons portés au-delà de la ligne d'avantage...) (Cunningham et al. 2018b), ce qui suggère qu'il peut être un indicateur de performance utile en plus d'une mesure de la condition physique.

Après la capacité aérobie, l'une des clés de la performance des joueurs en rugby est la capacité à répéter les sprints. En effet, on trouve dans la littérature des corrélations entre cette aptitude et un ratio de nombre de taches élevé dans le match (passes, rucks, placages...) (Smart et al. 2014). Cette capacité à répéter les sprints (ou RSA : « repeated-sprint ability ») a été définie

comme la capacité à produire la meilleure performance moyenne sur une série de sprints (d'une durée inférieure ou égale à dix secondes), séparés par de courtes périodes de récupération (d'une durée inférieure ou égale à 60 secondes) (Bishop et al. 2011). De là, de nombreux tests et protocoles sont apparus dans le rugby (Tableau 2.6). On constate que bien que les protocoles utilisés dans le rugby répondent tous à la définition de la RSA proposée par Bishop et al. (2011), une large diversité existe. En effet, tous ne s'accordent pas sur le nombre de sprints ou la distance de course à réaliser. Certains auteurs proposent des sprints sous la forme de sprints simples (Hamlin et al. 2012, Galvin et al. 2013, Hamlin et al. 2017, Glaise et al. 2022), sous forme d'aller-retour (Russell et al. 2015), ou une forme hybride de circuit mixant les formes d'efforts (sprints et jogging) (Smart et al. 2013). Ce qu'il est à noter d'intéressant, c'est que les données recueillies dans la littérature spécifique à la RSA dans le rugby concernent presque exclusivement des protocoles d'entraînement liés à l'hypoxie (Galvin et al. 2013, Hamlin et al. 2017, Fornasier-Santos et al. 2018), des méthodes de récupération (Hamlin et al. 2012) ou de réchauffement (Russell et al. 2015) et très peu à l'évaluation exclusive de la capacité à répéter des sprints (Smart et al. 2013, Glaise et al. 2022). Ceci pouvant s'expliquer par une réelle peur des staffs à l'idée de proposer des évaluations de la vitesse sous la forme d'un ou deux sprints (peur de la blessure), ce qui se complexifie encore un peu plus lorsque l'on évoque une répétition de 8 à 10 sprints de 20 à 40 m, même malgré le bienfondé de l'évaluation. Malgré le faible nombre d'études ayant traité de ce sujet, il est à noter le lien mis en évidence entre la capacité à répéter les sprints et les indicateurs de la performance physique en match (nombre de sprints, d'accélération ou la distance parcourue à haute intensité) (Glaise et al. 2022). Les auteurs ont mis en évidence des corrélations significatives ($p < 0,05$) entre la capacité à répéter les sprints et le nombre de sprints, d'accélération et la distance parcourue à haute intensité chez les avants, et le nombre de sprints et la distance à haute intensité chez les arrières (Glaise et al. 2022).

Tableau 2.6 : Différents protocoles d'évaluation de la capacité à répéter les sprints en rugby.

Référence	Protocole adopté	Paramètres mesurés
Hamlin et al. (2012)	10 x 40 m sprint	TMS
	Départ toutes les 30s	MTS
	Sprint terrain	% fatigue : $100 - \left(\frac{TMS}{MTS} * 100\right)$
Rugby-Specific Repeated-Speed (RS ²)		
Smart et al. (2013)	3 séries de 4 x 20 m sprint (départ 30s) pour Avants et 3 x 30 m sprint pour Arrières (départ 40s) entrecoupées de navette de 20 m en jogging	TMS 12 (Avants) TMS 9 (Arrières)
	avec un sac lesté (30kg)	TMS 12 ou 9 vs 1 ^{er} sprint
	Départ standardisé	% fatigue : calcul non décrit mathématiquement
	Sprint terrain	
Galvin et al. (2013)	10 x 20 m sprint	TTS (TTS)
	Récupération de 30s	% diminution vitesse : $\left(\frac{TTS}{10 \times MTS} - 1\right) * 100$
	Sprint terrain	

TMS : Temps moyen sprints ; MTS : Meilleur temps sprint ; TTS : Temps total sprints ; Vmin : vitesse minimale requise ; Vmax : vitesse maximale.

Tableau 2.6 : Différents protocoles d'évaluation de la capacité à répéter les sprints en rugby (suite).

Référence	Protocole adopté	Paramètres mesurés
Russell et al. (2015)	6 x (20+20 m sprint)	MTS
	Récupération de 20s	TMS
	Sprint terrain	TTS
Hamlin et al. (2017)	8 x 20 m sprint	TTS
	Départ toutes les 20s	% fatigue 1 : extrapolation linéaire du 1 ^{er} au 8 ^{ème} sprint
	Sprint terrain	% fatigue 2 : $(100 * \frac{TMS}{MTS}) - 100$
Fornasier-Santos et al. (2018)	40 m sprint jusqu'à épuisement	
	Départ toutes les 30s	Nombre sprints réalisés
	Vmin : 85% Vmax	
Glaise et al. (2022)	12 x 20 m sprint	TTS
	Départ toutes les 20s	% fatigue : $(\frac{TTS}{12 * MTS} - 1) * 100$
	Sprint terrain	

TMS : Temps moyen sprints ; MTS : Meilleur temps sprint ; TTS : Temps total sprints ; Vmin : vitesse minimale requise ; Vmax : vitesse maximale.

2.1.3.3.2. L'évaluation des qualités énergétiques chez les séniors

Très peu d'études récentes ont évalué les capacités énergétiques des joueurs de rugby élites séniors. Quelques études plus anciennes ou centrées sur un public non-élite sont à citer (O'Gorman et al. 2000, Scott et al. 2003, Sant'anna and de Souza Castro 2016, Swaby et al. 2016).

Sant'anna and de Souza Castro (2016) ont évalué les capacités énergétiques de joueurs de rugby amateurs brésiliens. Ils ont utilisé un test de $VO_2\text{max}$ en laboratoire et un Yo-Yo IR1. Ils ont évalué les $VO_2\text{max}$ des avants et des arrières à $51,6 \pm 10,1 \text{ ml.kg.min}^{-1}$ et $61,7 \pm 15 \text{ ml.kg.min}^{-1}$ respectivement, avec une moyenne des 42 joueurs testés à $56,0 \pm 13,7 \text{ ml.kg.min}^{-1}$. Les données moyennes de ce groupe d'amateurs sont comparables à celles rapportées par O'Gorman et al. (2000) chez des joueurs internationaux. Cette évolution est en lien avec l'évolution observée du profil des joueurs (Sedeaud et al. 2012, Sedeaud et al. 2013) et du jeu (Quarrie and Hopkins 2007). Les données par poste que Sant'anna and de Souza Castro (2016) sont largement supérieures à celles rapportées par Scott et al. (2003). Cette différence peut sans doute être expliquée aussi par l'évolution des qualités physiques, mais également par des tests différents utilisés. En revanche, dans les deux études, les auteurs ont observé des performances de $VO_2\text{max}$ supérieures chez les arrières que chez les avants. Sant'anna and de Souza Castro (2016), avec le Yo-Yo IR1 ont également observé de larges différences dans les distances finales réalisées par les avants ($792 \pm 278 \text{ m}$) et les arrières ($1283 \pm 313 \text{ m}$).

Swaby et al. (2016) ont mesuré une VMA de $4,2 \pm 0,4 \text{ m.s}^{-1}$ pour les avants et de $4,9 \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ pour les arrières. Les performances ont été évaluées comme significativement différentes entre les groupes de poste. Aussi, les auteurs ont relevé une hétérogénéité des VMA plus importante chez les avants que chez les arrières. Ce qui s'explique par une plus grande hétérogénéité des profils anthropométriques et physiques au sein des avants par rapport à des profils plus homogènes chez les arrières (Argus et al. 2012, Brazier et al. 2020).

Quel que soit le test utilisé pour évaluer les capacités aérobies des joueurs de rugby séniors, les résultats mettent systématiquement en évidence de meilleures performances réalisées par les joueurs des lignes arrières par rapport aux joueurs de devant (Scott et al. 2003, Sant'anna and de Souza Castro 2016, Swaby et al. 2016).

Du côté de la capacité à répéter les sprints, comme évoqué précédemment, très peu d'études évaluant les différentes qualités physiques en rugby se sont centrées spécifiquement sur l'évaluation de la capacité à répéter les sprints. L'étude qui nous semble la plus pertinente à citer et à commenter est celle de Smart et al. (2013) qui ont comparés la capacité à répéter les sprints entre des joueurs amateurs, semi-professionnels, professionnels et internationaux au moyen d'un test spécifique rugby («Rugby-Specific Repeated-Speed » (RS²)). Les auteurs ont relevé que chez les avants, les troisièmes lignes étaient les joueurs avec la meilleure capacité de répétition de sprint (meilleure moyenne sur les 12 sprints et la plus petite différence entre le temps moyen aux 12 sprints par rapport au sprint le plus rapide). Par ailleurs, les piliers seraient les joueurs avec la moins bonne capacité de répétition de sprints. Il est à noter que pour ce test RS², les auteurs ont intégré les joueurs de la charnière au protocole des avants. Ils ont observé de petites différences entre les n°9 et n°10 et les troisièmes lignes (0,9% d'écart en ce qui concerne la différence entre la moyenne des 12 sprints avec le sprint le plus rapide). Aussi, on relève une très large différence entre les joueurs de la charnière et les piliers (0,33s d'écart sur la moyenne des 12 sprints). Du côté des arrières (sans la charnière), les résultats semblent être plus homogènes. Les auteurs apportent également des éléments de comparaison entre les différents niveaux de pratique. Il est à noter pour les avants que seulement une petite différence du temps moyen sur les 12 sprints a été observée entre les internationaux et les semi-professionnels (2,6 ± 2,8 %). Sachant que la comparaison entre les amateurs et les semi-professionnels n'a pas montré de différence, nous pouvons affirmer que les avants

internationaux ont une meilleure capacité de répétition de sprint que les amateurs et les semi-professionnels (Smart et al. 2013). Aucune autre différence entre les niveaux n'est ressortie chez les avants. Pour les arrières, les auteurs ont constaté des différences de petites à modérées du temps moyen aux neuf sprints entre les niveaux. Des différences allant de $1,7 \pm 1,1 \%$ à $3,3 \pm 2,6 \%$, mettant en évidence la hiérarchie suivante dans la capacité à répéter les sprints : internationaux > professionnels > semi-professionnels > amateurs. En revanche, les comparaisons de la différence entre le temps moyen des neuf sprints par rapport au meilleur sprint ne montrent aucune différence entre les niveaux chez les arrières.

2.1.3.3.3. L'évaluation des qualités énergétiques chez les jeunes

Les données concernant les caractéristiques énergétiques des jeunes joueurs de rugby sont fournies par Casserly et al. (2019), Darrall-Jones et al. (2015), Darrall-Jones et al. (2016b), Lombard et al. (2015) ou encore Vaz et al. (2015) (Tableau 2.7). Casserly et al. (2019) et les deux études de Darral-Jones (Darrall-Jones et al. 2015, Darrall-Jones et al. 2016b) ont rapporté des distances réalisées lors d'un Yo- Yo IR1 test (Bangsbo et al. 2008) chez des jeunes U16, U18 et U20. Vaz et al. (2015) ont rapporté des VO_2 max estimées à partir du MSFT (« Multi Stage fitness test », test navettes, 20 m) (Ramsbottom et al. 1988) chez des joueurs U19 portugais, tandis que Lombard et al. (2015) ont rapporté le nombre de navettes réalisées dans le MSFT (Ramsbottom et al. 1988) pour les avants et les arrières chez des joueurs U20 d'élite.

Tableau 2.7 : Études présentant les caractéristiques énergétiques des jeunes joueurs de rugby à différentes catégories d'âge.

Référence	Poste	Âge (ans)	Yo- Yo IR1 (m)	30-15IFT (km.h ⁻¹)	Test navettes de	Estimation
					Leger (n courses 20m)	VO ₂ max (ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹)
Chiwariidzo et al. (2019)	Tous les postes	14,9 ± 0,31	1307,3 ± 228,6			
		15,5 ± 0,3	1144,6 ± 337,2	18,4 ± 1,3		
Darrall-Jones et al. (2015)	Tous les postes	16,9 ± 0,5	1225,0 ± 373,8	18,6 ± 1,1		
		19,0 ± 1,1	1243,0 ± 326,1	19,0 ± 1,1		

Tableau 2.7 : Études présentant les caractéristiques énergétiques des jeunes joueurs de rugby à différentes catégories d'âge (suite).

Référence	Poste	Âge (ans)	Yo- Yo IR1 (m)	30-15IFT (km.h ⁻¹)	Test navettes de	Estimation
					Leger (n courses 20m)	VO ₂ max (ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹)
Darrall-Jones et al. (2016b)	Avants	15,4 ± 0,3	971,4 ± 327,7	18,0 ± 1,4		
	Avants	16,9 ± 0,5	1080,0 ± 240,0	18,2 ± 1,1		
Casserly et al. (2019)	Avants	U18	1320 ± 362			
Vaz et al. (2015)	Avants	18,0 ± 0,5				47,08 ± 4,24
Darrall-Jones et al. (2016b)	Avants	18,9 ± 0,9	1142,9 ± 353,9	18,8 ± 1,3		
Casserly et al. (2019)	Avants	U19	1460 ± 320			
Lombard et al. (2015)	Avants	U20			De 88 ± 16 à 86 ±	
					15	
Casserly et al. (2019)	Avants	U20	1460 ± 387			

Tableau 2.7 : Études présentant les caractéristiques énergétiques des jeunes joueurs de rugby à différentes catégories d'âge (suite).

Référence	Poste	Âge (ans)	Yo- Yo IR1 (m)	30-15IFT (km.h ⁻¹)	Test navettes de	Estimation
					Leger (n courses 20m)	VO ₂ max (ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹)
Darrall-Jones et al. (2016b)	Arrières	15,6 ± 0,2	1346,6 ± 220,6	18,8 ± 1,1		
	Arrières	16,9 ± 0,6	1466,6 ± 450,9	19,2 ± 0,98		
Casserly et al. (2019)	Arrières	U18	2023 ± 197			
Vaz et al. (2015)	Arrières	17,8 ± 0,6				50,65 ± 3,76
Darrall-Jones et al. (2016b)	Arrières	19,3 ± 1,2	1384,0 ± 249,2	19,4 ± 0,5		
Casserly et al. (2019)	Arrières	U19	1954 ± 321			
Lombard et al. (2015)	Arrières	U20			De 101 ± 13 à 102 ± 12	
Casserly et al. (2019)	Arrières	U20	1943 ± 124			

Dans l'étude de Vaz et al. (2015), les arrières ont démontré une VO_{2max} estimée significativement plus importante que les avants ($50,65 \pm 3,76 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ contre $47,08 \pm 4,24 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$), en accord avec les résultats déjà rapportés chez des joueurs professionnels de rugby lors de l'évaluation maximale sur tapis roulant (Scott et al. 2003). Cependant le fait que dans l'étude de Vaz et al. (2015) la mesure de VO_{2max} ait été estimée sur la base du test de navette, signifie qu'il existe une erreur dans les valeurs attribuées aux joueurs, et donc une erreur dans les données moyennes des groupes d'avants et d'arrières présentées.

Lombard et al. (2015) ont rapporté le nombre de navettes complétées dans le MSFT pour les avants et les arrières U20. Les arrières ont effectué un nombre de navettes supérieur d'environ 11 % à celui des attaquants, ce qui met en évidence une plus grande capacité à répéter les courses de navettes, et démontrant de meilleures aptitudes aérobies chez les arrières. Malgré des problèmes méthodologiques relevés dans l'étude de Vaz et al. (2015), les résultats de Lombard et al. (2015) sont en accord avec ceux de Vaz et al. (2015), ainsi qu'avec les travaux de Scott et al. (2003) qui avaient déjà montré que les arrières étaient plus performants que les avants dans les tests énergétiques et de courses en navettes répétées. Darrall-Jones et al. (2016b) ont évalué les arrières au Yo – Yo IR1 test, comme ayant de meilleures capacités énergétiques que les avants, en U16, U18 et U21 d'un niveau national. Bien que les données disponibles dans ces études soient toutes différentes, dû à l'utilisation de protocoles différents (Darrall-Jones et al. 2016b) ou des résultats restitués de façon variée comme pour Vaz et al. (2015) et Lombard et al. (2015), on constate que chez les jeunes joueurs et peu importe le niveau de pratique (national ou international), les arrières ont de meilleures capacités aérobies.

Il est intéressant de noter que Lombard et al. (2015) ont signalé que le nombre de navettes effectuées dans le cadre du MSFT n'a pas augmenté au cours des treize années d'observation pour les avants ou les arrières. Montrant qu'en valeur absolue, la capacité aérobie serait la seule qualité testée à ne pas être améliorée au cours des treize ans (comparativement à la force ou la

vitesse). Or l'une des explications avancées par les auteurs est que ce résultat pourrait être dû au fait que les joueurs deviennent plus lourds au cours de la période étudiée. Ils font l'hypothèse que la capacité des joueurs U20 à effectuer un nombre de navettes similaire avec une masse corporelle plus importante met probablement en évidence un meilleur niveau d'aptitude aérobie, en raison d'une augmentation du coût énergétique pour effectuer le même volume de travail (Cunniffe et al. 2009, Lombard et al. 2015).

Des travaux récents ont évalué la capacité aérobie de jeunes joueurs de U16 à U21 (Darrall-Jones et al. 2016b, Casserly et al. 2019) au moyen du Yo- Yo IR1 test. À l'image des tendances décrites précédemment chez les U20, les distances relevées au Yo- Yo IR1 test sont unanimement plus élevées chez les arrières que chez les avants. Chez Darrall-Jones et al. (2016b), l'analyse de l'évolution des qualités aérobies montre de très faibles variations, distance au Yo- Yo IR1 supérieure chez les avants U18 par rapport aux U16. Aucune variation claire n'a été observée entre les évaluations réalisées en U18 et celles réalisées en U20 et U21 (Darrall-Jones et al. 2016b, Casserly et al. 2019). En revanche, l'impact de l'évolution de la masse corporelle sur les capacités aérobies a été évalué (Casserly et al. 2019). Dans un premier temps, les auteurs observent un effet trivial de l'évolution des performances au Yo- Yo IR1 test entre la première année en U18 et la troisième année en U20 chez les avants. Dans un second temps, lorsque les auteurs ont ajusté les résultats du Yo- Yo IR1 test à l'évolution de la masse corporelle, il semble que les avants aient de meilleures capacités physiques avec le temps (différence année 3 – année 1 : $1,2 \pm 0,9$). Aucun effet de la masse corporelle n'a été observé chez les arrières, certainement dû à une faible variation entre les années 1 et 3 ($+1,4 \pm 3,7$ % chez les arrières contre $+9,8 \pm 5,1$ % chez les avants) (Casserly et al. 2019).

Darrall-Jones et al. (2016a) ont évalué l'effet de la masse corporelle sur le résultat au 30-15IFT (Buchheit 2008) de joueurs de rugby de U16, U18, U21 et séniors. Ils constatent que les résultats absolus au test ne présentent aucune différence en fonction des catégories d'âge. En revanche,

lorsque les auteurs prennent en compte la masse corporelle comme covariable dans l'analyse, ils révèlent, comme Casserly et al. (2019), que les joueurs présentent de meilleures capacités aérobies avec les temps (U16 < U18 < U21 = Sénior) (Darrall-Jones et al. 2016a).

Pour finir, Jones et al. (2018) ont démontré que les jeunes U18 évoluant au plus haut niveau présentent de meilleures performances au Yo- Yo IR1 test que leurs homologues U18 d'un niveau inférieur. Des résultats renforcés au regard de l'effet de la masse corporelle précédemment présentés, puisque les joueurs d'académie ont une masse corporelle environ 13 % supérieure.

À notre connaissance, aucune étude n'a caractérisé la capacité de répétition de sprints en fonction des postes, des âges ou des niveaux de pratique chez les jeunes joueurs de rugby à XV.

Pour une organisation comme la FFR, l'évaluation des capacités énergétiques doit être partie prenante de la batterie de tests fédérale dès le plus jeune, surtout au vu de l'importance de la capacité aérobie en match sur la distance totale et supérieure à 15 km.h⁻¹ parcourue (Krustrup et al. 2003) ou encore le nombre et l'efficacité d'actions réalisées (plaquages, soutien au ruck, passes) (Cunningham et al. 2018b). Il semble nécessaire d'évaluer si à l'image des résultats présentés, les résultats absolus observés chez les jeunes joueurs français sont également similaires au cours de leur parcours de formation. Et plus important encore, la capacité aérobie est un paramètre important dans le devenir international des jeunes joueurs de la filière de formation française.

Points à retenir concernant les caractéristiques aérobies des jeunes joueurs :

- Très peu de variations de la capacité aérobie n'ont été observées de U16 à U20, de façon absolue.
 - À âge équivalent, les joueurs évoluant au plus haut niveau de pratique ont de meilleures capacités aérobies.
 - Les arrières ont une capacité aérobie supérieure aux avants.
 - La masse corporelle est un réel médiateur de la performance aérobie.
-

Pour conclure sur cet état des lieux des qualités anthropométriques et physiques des jeunes joueurs de rugby, nous avons relevé une augmentation significative des qualités anthropométriques des joueurs au cours du temps et une amélioration des différentes qualités physiques tout au long du parcours de formation du joueur (Argus et al. 2012, Darrall-Jones et al. 2015, Lombard et al. 2015, Vaz et al. 2015, Darrall-Jones et al. 2016a, Darrall-Jones et al. 2016b, Jones et al. 2018, Weakley et al. 2019b, Owen et al. 2020, Till et al. 2020). Aussi, ces qualités semblent être un critère principal du fait qu'un joueur évolue au plus haut niveau de pratique possible (Argus et al. 2012, Jones et al. 2018). Une réactualisation des données physiques des internationaux U20 semble pertinente, et une étude du profil physique des jeunes U18 internationaux semble justifiée. Il paraît maintenant approprié d'évaluer comment s'expriment ses qualités physiques au travers des déplacements et de l'activité combattue pendant les matchs de rugby. Est-ce que les différences de profils physiques observés chez les jeunes joueurs, en lien avec le poste occupé sur le terrain, impactent les performances physiques (déplacements et contacts) en match ?

2.2. L'ANALYSE DU DÉPLACEMENT ET DE L'ACTIVITÉ SPÉCIFIQUE DE COMBAT

Quel que soit le sport, l'analyse de la performance en match ou en compétition est le point d'entrée pour tout entraîneur afin de décortiquer collectivement et individuellement la production technique et physique de l'équipe. De ces résultats découlera une programmation de l'entraînement en lien avec les observations qu'aura fait l'encadrement.

Bien que le fait de croiser les aspects techniques et physiques de l'analyse semble fournir les informations les plus complètes, ce travail est très lourd et fastidieux à réaliser. Nous avons axé notre propos sur l'analyse physique du déplacement, associé à l'activité spécifique de combat que l'on retrouve dans le rugby au travers des placages, des rucks, des mauls, ou encore des mêlées.

2.2.1. Les outils d'analyse

2.2.1.1. Le déplacement

L'étude du déplacement des joueurs en sport collectif a commencé dans les années 70, Reilly (1976) a mis en place une analyse notationnelle basée sur une analyse de la vidéo en football. Pour ce faire, ils ont utilisé une reproduction du terrain codée permettant d'estimer la position et les distances parcourues par les joueurs. L'activité des joueurs était ensuite codée sur la base de la vidéo, selon des critères permettant de classifier le déplacement dans son niveau d'intensité. Un exemple de classification utilisée par Deutsch et al. (2007) est décrit dans la Tableau 2.8. Dans chaque catégorie d'intensité, les actions du joueur étaient comptabilisées et chronométrées. Ce travail long et fastidieux a été légèrement amélioré grâce à l'outil informatique. Pour autant, Duthie et al. (2005) ont relevé des niveaux de reproductibilité faible à modérée en utilisant cette méthode notationnelle. Bien que peu coûteuse en matériel, cette

méthode présente les inconvénients majeurs d'un temps d'analyse conséquent et une reproductibilité modérée des résultats. Ces facteurs, associés à l'émergence de technologies plus avancées, ont favorisé l'utilisation de méthodes semi-automatiques.

Tableau 2.8 : Exemple de classification des efforts lors d'une analyse notationnelle (sur la base des travaux de Deutsch et al. (2007)).

Catégories :	Descriptions :
Debout	Debout ou allongé sur le sol, sans être engagé dans une activité de combat.
Marche	Marche en avant ou en arrière, doucement. Un pied est toujours en contact avec le sol.
Jogging	Courir en avant doucement, afin de changer de position.
Course à haute intensité	Courir avec un but manifeste et avec effort, accélérant avec de longues foulées, mais pas de manière maximale (75%).
Sprint	Course dont l'effort est quasiment maximal ou maximal, avec des mouvements de bras amples et des mouvements de tête.
Ruck / Maul	Le joueur est attaché au ruck ou au maul.
Mêlée	Le joueur est attaché à une mêlée en cours. Une fois que le ballon sort de la mêlée ou que le jeu est arrêté, la mêlée n'est plus considérée en cours.

Très présents dans le football, les systèmes semi-automatiques ont encore aujourd'hui largement leur place en compétition (contrats entre les sociétés prestataires et les ligues mettant à disposition toutes les données aux clubs). Historiquement, des sociétés comme Amisco[®] (Sport Universal Process, Nice, France) et ProZone[®] (Leeds, West Yorkshire, Angleterre), qui ensuite ont fusionné et ont été absorbés par STATS Perform (STATS LLC, Chicago, Illinois,

États-Unis), ont été les précurseurs dans l'utilisation des systèmes de suivi vidéo. À l'instar de STATS Perform, aujourd'hui de nouvelles sociétés comme Second Spectrum (Los Angeles, États-Unis) ou ChyronHego (New York, États-Unis) sont fournisseurs de données de déplacement dans les plus grands championnats de football européens. Ces systèmes de suivi passif du joueur sont basés sur l'utilisation de caméras placées autour du terrain et calibrées en fonction de la taille et l'architecture du stade. Une identification préalable de chaque joueur est réalisée (portant notamment sur le numéro et la couleur de maillot) pour assurer un suivi automatique de la trajectoire du joueur. Di Salvo et al. (2006) affirmaient que la technologie ProZone[®] était un système valide pour l'analyse du mouvement des joueurs en match de football (Di Salvo et al. 2006). Plus récemment, Linke et al. (2020) ont évalué la validité du système TRACAB[®] de ChyronHego par rapport à un système de référence, le système Vicon[®] (Vicon[®] Motion Systems, Oxford Metrics, Angleterre) (Linke et al. 2020). Les auteurs ont rapporté une erreur quadratique de 0,09 m par rapport à la position estimée (effet trivial), 0,09 m.s⁻¹ pour la vitesse instantanée (effet trivial) et 0,26 m.s⁻² pour l'accélération (effet trivial). La distance totale parcourue, la vitesse maximale et l'accélération maximale mesurées par le système vidéo présentent toutes une faible déviation par rapport au Vicon (respectivement : $0,42 \pm 0,60$ % ; $1,13 \pm 1,97$ % et $-0,13 \pm 5,25$ % ; avec un effet trivial pour chaque paramètre). À ce jour, ces systèmes sont encore largement utilisés par les clubs de football en match. Pour autant, ils ont un certain coût et supposent une installation permanente, ne permettant pas d'équiper les centres d'entraînement ou tout autre terrain utilisé dans le cadre de camp d'entraînement par exemple. Empêchant ainsi l'évaluation et la quantification de l'activité des joueurs à l'entraînement. De plus, en rugby, les phases de jeu dans de petits espaces (les mêlées, les mauls ou les rucks) créent des phénomènes d'occlusion, empêchant la bonne acquisition de position du joueur.

C'est dans ce contexte que le système GPS (Global Positioning System) a fait son apparition dans le sport collectif, et plus particulièrement dans le rugby.

2.2.1.1.1. Le GPS

L'outil GPS, comme beaucoup d'innovations de la vie courante, nous vient du monde militaire. Le département de la défense américain a mis au point un système de navigation utilisant les satellites en orbite autour de la Terre. On mesure alors le temps de parcours nécessaire au signal radio pour être transmis entre la balise sur Terre et le satellite. Grâce à la vitesse de propagation du signal radio, on peut dès lors mesurer la distance séparant la balise au satellite. En calculant la distance à au moins trois satellites (quatre pour une meilleure précision), la position exacte peut être déterminée de manière trigonométrique (Figure 2.3) (Larsson 2003).

Une utilisation et une application spécifique dans le sport ont alors émergé. En 2010, la fédération internationale de rugby, l'International Rugby Board (IRB, aujourd'hui World Rugby), a autorisé l'utilisation de système GPS en compétition. Pour cela, les balises doivent passer une série de contrôles afin d'obtenir l'agrément « Approved Word Rugby » (« approuvé par World Rugby »).

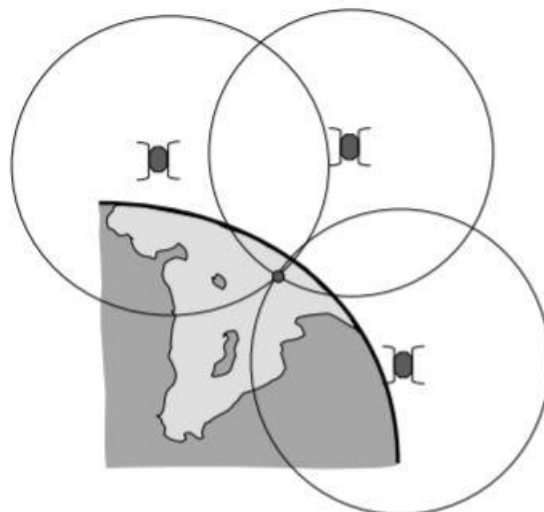


Figure 2.3 : Principe de détermination de la position par le système GPS (d'après les travaux de Larsson (2003)).

Dès lors, de nombreux travaux se sont attachés à démontrer la validité ainsi que la reproductibilité de ces systèmes dans des situations de sport collectif d'extérieur (Coutts and Duffield 2010, Gray et al. 2010, Varley et al. 2012b). Afin de tester les GPS, les chercheurs ont fait appel à différentes méthodologies et différents outils d'analyse. Des circuits de déplacement, à différentes allures, ont été créés afin de maîtriser les distances parcourues par le sujet (Coutts and Duffield 2010, Gray et al. 2010). Un exemple de circuit, utilisé par Coutts and Duffield (2010) est présenté en Figure 2.4. Ce circuit a récemment été adopté lors de la consultation GPS conjointement menée par la Ligue Nationale de Rugby (LNR) et la FFR lors de la partie de validation technique. Selon les études, les auteurs ont comparé les performances enregistrées par les systèmes GPS testés (distances, vitesses moyennes ou maximales) à celles collectées dans le même temps par des cellules de vitesse (Coutts and Duffield 2010) ou un radar (Gray et al. 2010, Lacomme et al. 2019). Varley et al. (2012b), ont mis en évidence que la précision et la reproductibilité des mesures GPS augmentaient avec la fréquence d'acquisition du système (Varley et al. 2012b, Crang et al. 2020). Historiquement à 1Hz, les GPS du marché actuel proposent une fréquence d'acquisition d'au moins 10 Hz comme l'ont recommandé Varley et al. (2012b). Ces mêmes auteurs ont testé la validité et la fiabilité des systèmes à des vitesses constantes caractérisées selon des zones de 1-3, 3-5, 5-8 m.s⁻¹. Les auteurs montrent que la validité (coefficient de variation (CV) = 8,3 ± 0,3, 4,3 ± 0,2 et 3,1 ± 0,1 %, respectivement par zone) et la fiabilité (CV = 5,3 ± 0,2, 3,5 ± 0,2 et 2,0 ± 0,1 %, respectivement) augmentent à mesure que la vitesse augmente. De récents travaux ont montré une grande précision dans la mesure de la vitesse maximale en utilisant des GPS à 16 Hz (Lacomme et al. 2019). Ces mêmes auteurs ont relevé une fiabilité acceptable entre les balises pour la mesure de l'accélération maximale, et plus particulièrement quand une moyenne mobile de 0,5 s est utilisée pour filtrer le signal (CV : 6,4 vs 3,9 % ; Erreur typique : 0,54 vs 0,33 m.s⁻² pour l'accélération maximale brute et l'accélération maximale filtrée respectivement).

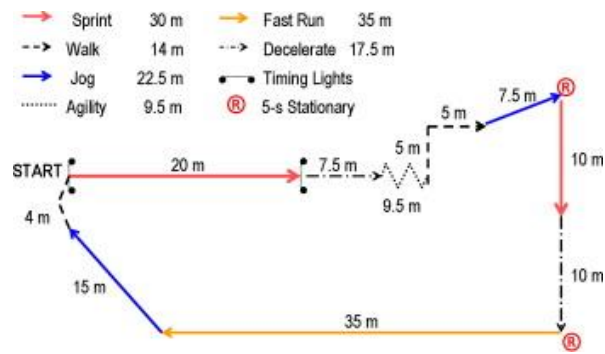


Figure 2.4 : Circuit de déplacement en sport collectif (d'après les travaux de Coutts and Duffield (2010)).

La littérature confirme donc l'utilisation de système GPS pour l'analyse de l'activité en sport collectif. Pour autant, les récents travaux de Malone et al. (2017) mettent en évidence qu'un cadre doit être appliqué quant à l'exploitation de ces données (Malone et al. 2017). Il recommande notamment aux auteurs d'articles scientifiques traitant des données GPS de préciser la marque et la version du logiciel et du système d'exploitation des GPS, la fréquence d'acquisition, le nombre moyen de satellites captés lors de la session, le HDOP (horizontal dilution of precision). Le HDOP étant un critère permettant de décrire l'impact de la configuration des satellites captés. Quand les satellites sont regroupés dans une même zone dans le ciel, la configuration est considérée comme faible, la valeur de HDOP est plus élevée (Figure 2.5). Lorsque les satellites sont uniformément répartis dans le ciel, la configuration est alors considérée comme forte, la valeur de HDOP est plus faible (Figure 2.5). On tendra donc à avoir des valeurs de HDOP les plus faibles possibles. Malone et al. (2017) considèrent les valeurs de HDOP inférieures à 1 comme idéales et 6 le nombre minimal de satellites. Ces critères, bien que pouvant être strictes et excluant dans un cadre scientifique (limite minimale

du nombre de satellites ou du HDOP), doivent être pris en compte par les praticiens même au quotidien dans l'entraînement.

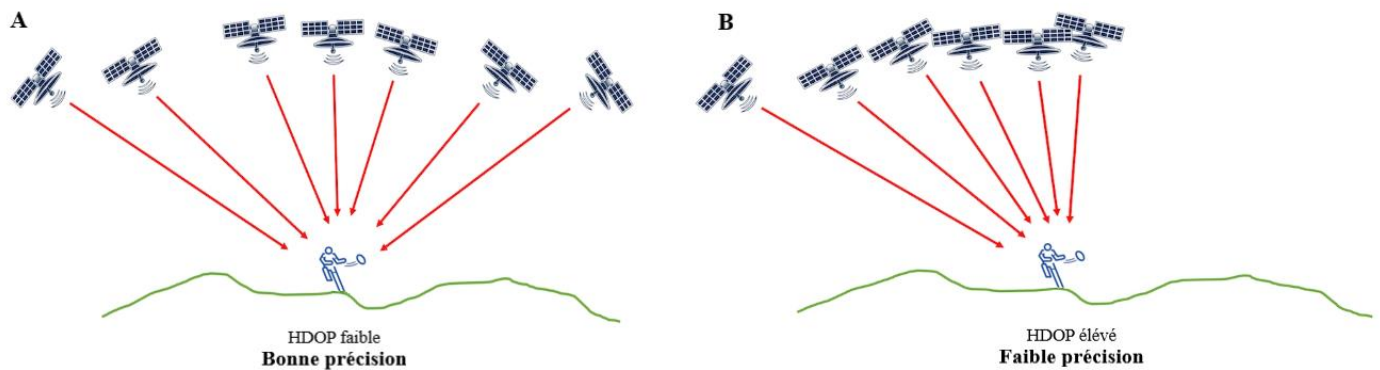


Figure 2.5 : Schéma montrant une configuration optimale des satellites (A) et une mauvaise configuration (B).

2.2.1.1.2. Les métriques

Les GPS actuels, grâce aux grandes possibilités de paramétrages offertes par les fabricants, proposent une déclinaison de plusieurs centaines de données exploitables postsession. Il semble évident que certaines ont plus de pertinence que d'autres. Les données renvoient à une quantification du mouvement ou d'actions spécifiques (accélérations, décélérations, contacts, etc.). Ces paramètres quantitatifs se déclinent en une multitude de seuils caractérisant la performance de façon plus qualitative.

Le point d'entrée des échanges avec les différents membres du staff est la distance totale (DT), parcourue en mètre (m). Celle-ci informe sur le volume de déplacement du joueur sans caractériser l'intensité. Cette DT peut être relativisée au temps de jeu en minutes (min) du joueur, et est alors appelée distance relative (DR), exprimée en $m \cdot min^{-1}$. La DR renseigne sur le rythme de l'activité. Elle peut être facilement utilisée pour comparer les joueurs, peu importe le niveau de pratique ou la catégorie, tout en ayant en connaissance des spécificités qui les

composent. Par exemple, pour la catégorie U18, les matchs ne durent que 70 minutes contre 80 à partir des U20, les DT ne sont évidemment pas comparables, il convient donc d'analyser la DR.

Ensuite, les distances par zone de vitesse permettent une meilleure caractérisation de l'intensité. À l'image des allures utilisées dans l'analyse notationnelle et décrites précédemment, différentes zones de vitesses sont employées par les praticiens pour caractériser la quantité totale de mouvement des joueurs. On retrouve classiquement les catégories suivantes : « Immobile », « Marche », « Jogging », « Course », « Sprint ». Toutes ces zones de vitesse renvoient à des vitesses absolues. La revue de littérature proposée par Cummins et al. (2013) sur l'utilisation des systèmes GPS dans les sports collectifs met en évidence un réel manque de consensus dans la classification des zones de vitesse, entre les sports, et au sein même d'un sport. En effet, l'utilisation de seuils arbitraires d'une étude à l'autre rend compliquée la lecture et la comparaison des résultats. Cummins et al. (2013) citent par exemple l'étude de Suárez-Arrones et al. (2012), définissant leur première zone de vitesse entre 0,1 et 5,9 km.h⁻¹ (la position debout et la marche). Hartwig et al. (2008) quant à eux définissent deux zones distinctes, séparant la position debout de la marche, mais malheureusement avec des seuils de vitesse différents : debout : de 0 à 1 km.h⁻¹ et la marche de 1 à 7 km.h⁻¹. Ce qui rend toute comparaison impossible. Ce constat est le même pour les autres zones de vitesse (Cummins et al. 2013). Aussi, Duthie et al. (2003) ayant observé des vitesses maximales environ 30 % plus faibles chez les avants que chez les arrières, l'utilisation de seuil de vitesse identique à tous les joueurs semble moins adaptée, surtout pour la très haute vitesse. C'est pourquoi Cahill et al. (2013) ont fait partie des premiers à proposer l'utilisation de seuils de vitesse relatifs à des performances intrinsèques du joueur, comme par exemple la vitesse maximale (V_{max}). Ils ont défini leur critère de haute intensité comme la distance parcourue au-delà de 51 % de la V_{max}. Les auteurs n'ont pas observé de différence entre les avants (897 m) et les arrières (872 m)

(Cahill et al. 2013), à la différence de nombreuses études qui ont analysé que les arrières parcouraient une distance à haute intensité supérieure aux avants (Cunniffe et al. 2009, Tee and Coopoo 2015, Cunningham et al. 2016a). Lovell and Abt (2013) ont également conseillé l'individualisation de la vitesse sur la base de données physiologiques comme la VMA afin de contrôler la charge externe liée à l'activité. Ce manque de consensus entre les seuils absolus ou relatifs nous force alors à être prudents dans la lecture et la comparaison des données liées à différentes zones de vitesse. Comme pour la DT, les distances par zone peuvent être relativisées au temps afin d'être facilement comparables entre les joueurs. Ces comparaisons étant compliquées, voire impossibles, nous ne traiterons pas des données brutes dans ce manuscrit, mais des tendances observées par les auteurs entre les postes, les niveaux de pratique ou les âges.

Pour finir, l'accélération est un indicateur mesuré par l'outil GPS. Dérivée de la vitesse, l'accélération renvoie à la capacité d'un joueur à changer de rythme dans un temps le plus court possible. Elle est exprimée en $m.s^{-2}$. Lorsqu'elle est négative, c'est une décélération.

Les athlètes de sports collectifs sont contraints d'accélérer et de décélérer lors des matchs, ces actions sont considérées comme importantes au cours d'un match (Duthie et al. 2003, Delaney et al. 2018, Harper et al. 2019). La validité et la fiabilité de la mesure des accélérations et décélérations ont été évaluées par Varley et al. (2012b). L'étude a montré que lors de l'accélération à partir de vitesses de $1-3 m.s^{-1}$, $3-5 m.s^{-1}$ et $5-8 m.s^{-1}$, la validité augmentait avec la vitesse de départ (coefficient de variation (CV) GPS 5 Hz = 14,9-7,1 % ; GPS 10 Hz = 5,9-3,9 %), bien que la majorité des sprints au rugby commence à partir d'un départ debout ou à partir d'une faible vitesse de déplacement (Gabbett 2012). La fiabilité des accélérations a montré une tendance similaire à la donnée de vitesse entre les appareils de 5 et 10 Hz, mais les décélérations n'étaient pas aussi valides (CV = 11,3-33,2 %) ou fiables (CV = 12,5-15,0 %). Cela démontre que les dispositifs de 10 Hz offrent une meilleure validité et fiabilité que les

dispositifs à plus faible fréquence d'acquisition (5 Hz) bien que la technologie actuelle soit moins en mesure de quantifier précisément les décélérations. Buchheit et al. (2014) ont évalué la fiabilité des accélérations entre différents modèles de GPS (SPI ProX, firmware 2.3.4, SPI ProX2 [SPI ProX2a, firmware 2.6.1, et SPI ProX2b firmware 2.6.4], 15 Hz, GPSports). Les résultats ont montré que certains appareils du même modèle ont mesuré entre deux et six fois plus d'accélérations et décélérations ($>3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ et $>4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). En outre, la fiabilité (CV) entre les appareils était comprise entre 31 et 56 %. D'autres travaux de validation des accélérations ont été menés par Akenhead et al. (2014), qui ont disposé des GPS sur une plateforme positionnée sur un rail et tractée par les joueurs en train d'accélérer, tandis que l'ensemble du dispositif était monitoré par un radar laser servant de critère de mesure (2000 Hz optoNCDT ILR 1191, Micro-Epsilon Messtechnik GmbH and Co). En comparaison avec le radar, les GPS (10 Hz MinimaxX S4, 6.75 firmware, Catapult Sports) ont montré que lorsque la vitesse des accélérations augmentait (c'est-à-dire 0-1, 1-2, 2-3, 3- 4, $>4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$), la validité et la fiabilité diminuaient, rendant très compliquée la quantification avec précision les accélérations supérieures à 3 et 4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Comme pour les différents seuils de vitesse par zone, le choix des seuils d'accélération ne semble pas faire consensus dans la littérature. Seules les tendances dégagées par les auteurs seront donc présentées. Par ailleurs, nous constatons que les données liées au nombre d'accélérations ne sont pas systématiquement analysées dans la littérature décrivant la demande physique en match de rugby.

Différentes méthodes peuvent être ensuite utilisées pour analyser le match de façon la plus globale possible en apportant des données moyennes sur l'activité des joueurs ou d'un groupe de joueurs, ou en analysant de façon plus précise certaines phases de jeu qui auraient plus d'importance aux yeux des entraîneurs (notamment l'activité de déplacement quand le ballon est en jeu).

2.2.1.2. L'activité de combat

Le contact est un des éléments les plus caractéristiques du rugby. Il est associé à des tâches de différentes natures, intensités et d'une fréquence fluctuante en fonction des postes. Les principales actions de contacts répertoriées sont les placages, les rucks, les mauls et les mêlées (Tableau 2.9).

Dans la littérature, plusieurs méthodologies sont répertoriées pour la quantification du contact. L'utilisation d'un codage vidéo manuel (Lindsay et al. 2015a) ou l'utilisation de l'outil GPS pour l'identification des collisions (Boyd et al. 2011, Roe et al. 2016b, Read et al. 2017b, Read et al. 2018a, Tierney et al. 2020).

Tableau 2.9 : Nature des contacts en rugby à XV.

Nature du contact	Description	Participation
Placage	Action défensive visant à arrêter un adversaire en le ceinturant.	Sont impliqués le plaqueur et le plaqué.
Ruck	Rassemblement de joueurs au sol (ruck) ou debout (maul).	Sont impliqués les joueurs au soutien
Maul		offensif ou défensif
Mêlée	Affrontement des avants des équipes, qui fait suite à une faute de jeu, pour le gain du ballon.	Sont impliqués les huit avants.

Le codage vidéo est la source la plus simple et fiable d'analyse de l'activité combattue des joueurs. En effet, la variabilité intracodeur a été évaluée par Hendricks et al. (2014b) comme étant « presque parfaite ». Une étude de validité intercodeurs a mis en évidence dans le football une erreur typique standardisée allant de 0 à 0,37, avec un coefficient de corrélation intra-classe

allant de 0,88 à 1,00 (Liu et al. 2013). Mettant ainsi en avant un très haut niveau de fiabilité dans l'utilisation des données du codage vidéo.

L'outil GPS semblerait également être en capacité de mesurer un nombre de collisions et/ou une charge associée à ces collisions (« Playerload » (PL)). En effet, les accéléromètres triaxiaux (x,y,z), logés dans les balises, sont utilisés pour mesurer les accélérations et les décélérations. L'accéléromètre calcule les forces (en G) en divisant le taux d'accélération et de décélération sur chaque axe par la gravité ($9,8 \text{ m.s}^{-2}$). Cette information est ensuite utilisée pour estimer le niveau des impacts. L'inclusion supplémentaire de gyroscopes et de magnétomètres permet d'évaluer l'orientation et la rotation pendant les événements d'accélération et de décélération (Gastin et al. 2014). Boyd et al. (2011) ont testé la fiabilité intra et interbalises du paramètre de PL (100 Hz MinimaxX 2.0, Catapult Sports). Le dispositif présente un coefficient de variation (CV) acceptable pour la fiabilité intra (0,91-1,05 %) et inter (1,02-1,10 %). Des résultats similaires ont été montrés par Nicolella et al. (2018) pour la fiabilité intra avec un CV entre 0,01 et 3,00 %, cependant, la fiabilité inter-GPS a montré des résultats plus hétérogènes avec des différences faibles à importantes. Cela suggère que les joueurs devraient porter la même balise au cours de la saison pour comparer les résultats de la balise par rapport à elle-même. La validité de la mesure du PL pour représenter le nombre de collisions subies par les joueurs de rugby pendant les matchs a été examinée par Roe et al. (2016b). L'étude a montré que le PLslow, accumulation des événements mesurés lorsque la vitesse est inférieure à 2 m.s^{-1} , avait une relation très importante ($r = 0,79$) avec le nombre de collisions. Les auteurs ont conclu que ce paramètre pouvait être utilisé comme mesure de l'activité combattue. Comme le PLslow ne s'accumule que lorsque la vitesse est inférieure à 2 m.s^{-1} , il est probable qu'il s'accumule dans les activités de collision telles que les mêlées, les rucks, les plaquages, qui sont des événements statiques par nature. La variable de PL présente également une bonne corrélation avec le nombre de contacts ($r = 0,72$) chez les avants, mais plutôt médiocre chez les arrières ($r = 0,47$).

Le PL étant presque parfaitement corrélé ($r = 0,94$) à la distance parcourue, on peut se questionner quant à la pertinence réelle de l'utilisation de ce paramètre comme quantification des collisions. Par conséquent, cela suggère que la variable PLslow pourrait être une mesure alternative représentant l'activité combattue pendant les matchs de rugby à XV.

Tierney et al. (2020) ont proposé d'évaluer la relation entre le nombre de collisions mesurées par l'analyste vidéo, avec le nombre de collisions détectées par le GPS (10 Hz Apex, StatSports, Irlande du Nord) et la charge associée (« Collision Load »). Les auteurs relèvent de façon rassurante que les deux paramètres mesurés par le GPS (nombre et charge des collisions) étaient presque parfaitement corrélés ($r = 0,98$). Ensuite, ils ont montré que le nombre de contacts codés par l'analyste était très largement et presque parfaitement corrélé à la charge combattue ($r = 0,89$) et au nombre de collisions enregistrées par le GPS ($r = 0,91$) respectivement. Suggérant que l'utilisation du GPS pour quantifier les contacts en rugby au moyen des balises Apex, StatSports était justifiée.

Une étude similaire menée par Reardon et al. (2017a), comparant le codage vidéo avec le nombre de collisions fourni par les balises S5 de Catapult Sport (Catapult Innovations, Australie). Leurs résultats semblent plus mitigés que Tierney et al. (2020). Malgré tout, les auteurs avancent que cette technologie permet d'identifier une tendance dans la fréquence des collisions entre les groupes de poste.

Points à retenir sur les paramètres de déplacement et de contact analysés :

- La DT rend compte de la quantité globale de déplacements réalisés par le joueur, alors que la DR permet de caractériser le rythme de déplacement de ce joueur au regard de son temps de jeu.
 - La distance parcourue peut être découpée par zone d'intensité de course, soit au moyen de seuils absolus soit des seuils relatifs aux capacités du joueur (Vmax ou VMA).
 - Les accélérations et décélérations sont un reflet fiable de l'activité mécanique de changement de rythme du joueur de rugby.
 - Que ce soit pour les seuils de vitesse ou d'accélérations/décélérations, le manque de consensus dans la littérature rend difficiles les comparaisons absolues des résultats, les tendances observées peuvent être plus facilement discutées.
 - La quantification du contact dans le rugby passe par un codage manuel d'actions spécifiques (les placages, les rucks, les mauls et les mêlées) ou une quantification grâce au GPS.
 - Les fournisseurs GPS donnent accès au nombre de contacts et/ou à la charge associée au contact (PL, PLslow ou Collision Load).
-

2.2.2. Les différents types d'analyse

2.2.2.1 Analyse globale du match

La distance totale (DT) et la distance relative (DR)

La littérature analysant l'activité des joueurs en fonction des postes a démontré qu'à tout âge et à tout niveau, les joueurs évoluant à l'arrière parcourent une DT significativement plus grande que les avants (Coughlan et al. 2011, Cunningham et al. 2016a, Dubois et al. 2017, Beard et al. 2019) (Tableau 2.10). Beard et al. (2019) n'ont pas observé de différence significative dans l'activité totale ou relative en comparant les séniors lors de matchs internationaux par rapport aux séniors évoluant en club. Seuls les ailiers et arrières internationaux parcourent significativement plus de DT ou DR que leurs homologues en club (+ 10,8 % et + 12,3 % respectivement) (Beard et al. 2019). Ces récents résultats vont dans le sens de ceux observés par Cunningham et al. (2016b) qui comparaient l'activité de déplacement des séniors internationaux avec celle des internationaux U20. Ils observaient une DR significativement plus grande chez les séniors que chez les U20 sur tous les groupes de postes des lignes arrières

(charnière, centres et les joueurs du champ profond). En revanche, aucune différence significative n'a été observée entre les postes d'avants.

La littérature chez les plus jeunes met en évidence des résultats un peu différents. En effet, Read et al. (2017b) ont montré que lors de matchs à un niveau national, les avants et les arrières U18 avaient un déplacement, respectivement presque certainement et très probablement, plus important que les U20. Bien que ces résultats aillent dans le sens d'observations empiriques faites sur le terrain par nos entraîneurs, il semble important de noter que les conclusions de l'article sont basées sur un très faible échantillon de matchs sélectionnés, seulement deux par catégories d'âge.

Dans une autre étude, les auteurs ont comparé l'activité de déplacement des joueurs U18 d'académies de clubs professionnels avec celle de joueurs universitaires (i.e. : avants : $21,3 \pm 1,6$ ans ; arrières : $21,1 \pm 2,1$ ans) (Read et al. 2017a). Les auteurs ont observé chez les universitaires, donc plus âgés, une DR probablement plus importante que les U18 chez les avants et les arrières. À l'image des internationaux U20 avec les séniors internationaux, les jeunes joueurs U18 d'académies de clubs professionnels ont une activité de déplacement inférieure aux joueurs universitaires. Cette même étude ne montre pas de différence très marquée entre les U16 et les U18. Les auteurs relèvent seulement une DR supérieure chez les avants U16 par rapport aux U18. De plus, il est à noter que l'écart entre les avants et les arrières est grandissant avec l'âge, au profit d'une plus grande DR des arrières (U16 : différence pas claire ; U18 : taille de l'effet (TE) = $-0,72 \pm 0,57$; Universitaire : TE = $-2,11 \pm 0,57$).

La littérature actuelle n'a encore jamais caractérisé le niveau international U18. Il semble important de connaître les exigences de déplacement du niveau international U18 pour ensuite le comparer à celles du niveau international U20 et comprendre si l'environnement compétitif de développement des plus jeunes est cohérent avec celui de la catégorie du dessus. Donc évaluer les différences des performances physiques en match qu'il peut exister entre les U18 et

les U20. C'est d'autant plus vrai au regard du nombre grandissant de jeunes U18 surclassés et sélectionnés dans les effectifs des U20 (quatre joueurs U18, sur 26 joueurs, ont participé l'édition 2021 du tournoi des 6 Nations U20, dont trois y ont été titulaires à plusieurs reprises).

Points à retenir concernant la spécificité du déplacement en match des jeunes joueurs :

- Les différences entre les catégories d'âge ne sont pas unanimes. Il semble que les U16 aient une activité de déplacement identique, voire supérieure aux U18, mais inférieure à des joueurs plus âgés comme les universitaires.
 - L'activité de déplacement observée chez les internationaux U20 est plus faible que celle des internationaux séniors.
 - Les arrières parcourent une distance totale et relative plus importante en match que les avants, écart grandissant avec l'âge.
-

Tableau 2.10 : Études présentant les distances totales et/ou relatives parcourues au cours d'un match de rugby à XV en fonction de la catégorie, du niveau et du poste.

	Avants			Arrières		
	Catégorie	Niveau	DT (m)	DR (m.min ⁻¹)	DT (m)	DR (m.min ⁻¹)
Coughlan et al. (2011)	Sénior	International	6427		7002	
Pollard et al. (2018)	Sénior	International	-	65,7	-	69,7
Beard et al. (2019)	Sénior	International	1L : 4751	1L : 67	Charnière : 6483	Charnière : 78
			2L : 5728	2L : 70	Centres : 6454	Centres : 76
			3L : 6133	3L : 72	Ailiers/Arrière : 7229	Ailiers/Arrières : 82
Beard et al. (2019)	Sénior	Club	1L : 4689	1L : 64	Charnière : 6022	Charnière : 75
			2L : 5592	2L : 68	Centres : 6298	Centres : 72
			3L : 5735	3L : 68	Ailiers/Arrière : 6447	Ailiers/Arrières : 73
Cahill et al. (2013)	Sénior	Club	5850	64,6	6545	71,1
Suárez-Arrones et al. (2012)	Sénior	Club	5853		6471	
Campbell et al. (2018)	Sénior	Club	1L : 4885	1L : 61,6	Charnière : 5760	Charnière : 66,2
			2L : 5278	2L : 64,1	Centres : 5482	Centres : 64
			3L : 5457	3L : 62	Ailiers/Arrière : 6166	Ailiers/Arrière : 70,8
Cunningham et al. (2016b)	Sénior	International	-	66,8	-	73,3
	U20	International	-	61,5	-	69,1
Cunningham et al. (2016a)	U20	International	1L : 4970	1L : 60,1	Charnière : 5840	Charnière : 67,5
			2L : 5410	2L : 60,8	Centres : 6510	Centres : 70,5
			3L : 5670	3L : 63,2	Ailiers/Arrière : 6180	Ailiers/Arrière : 68,7
Carling et al. (2017)	U20	International		De 53,8 à 63,6		De 64,7 à 71,3
Read et al. (2017b)	U20	Régional	-	65,3	-	70,9
	U18	Régional	-	74,9	-	78,7
Read et al. (2017a)	Sénior	Universitaire	4683	66,6	5889	71,1
	U18	Régional	4232	64,2	4489	68,3

DT : distance totale ; DR : distance relative ; 1L : première ligne ; 2L : deuxième ligne ; 3L : troisième ligne.

Les distances parcourues par zone de vitesse

Malgré des seuils de vitesse différents choisis pour définir les zones d'intensité, les études ont mis en évidence une activité à haute intensité (HI) (course et sprint) plus importante chez les arrières que chez les avants (Cunniffe et al. 2009, Tee and Coopoo 2015, Cunningham et al. 2016a), et une activité à basse intensité (marche et jogging) plus grande chez les avants que les arrières (Tee and Coopoo 2015). Par ailleurs, plusieurs études ont déjà démontré que l'utilisation de seuils de vitesse absolue pour définir la HI sous-estimait les capacités de déplacement à haute vitesse des avants et surestimait celles des arrières (Cahill et al. 2013, Reardon et al. 2015).

Comme évoqué précédemment, des tendances peuvent être observées dans la littérature sur la comparaison entre les postes, entre les niveaux de jeu ou les catégories d'âge. Ainsi, on observe une plus grande distance parcourue à haute intensité absolue par les arrières que par les avants (Deutsch et al. 1998, Cunningham et al. 2016a, Campbell et al. 2018). La distance à haute intensité relativisée au temps de jeu apparaît également supérieure chez les arrières que chez les avants ($p < 0,05$) (Cunningham et al. 2016a). Cahill et al. (2013) relèvent que les arrières parcourent plus de distance à très faible intensité (46,3 % en station debout ou en marchant) alors que les avants parcourent la plupart de leur déplacement en jogging (46,2 %). Beard et al. (2019) constatent une large hétérogénéité au poste sur les distances dites de haute intensité ($> 5,6 \text{ m.s}^{-1}$). Chez les avants, les auteurs relèvent des données allant de 49 m (pour les piliers) à 168 m (en troisième ligne), et chez les arrières de 455 m (pour la charnière) à 441 m (pour les joueurs du champ profond) (Beard et al. 2019).

Une analyse comparative du niveau international sénior avec le niveau professionnel sénior a été proposée par Beard et al. (2019). Après avoir mesuré les distances et le nombre d'efforts réalisés au-dessus de $5,6 \text{ m.s}^{-1}$ et de $7,5 \text{ m.s}^{-1}$ (respectivement 20,2 et 27 km.h^{-1}), aucune différence n'a été constatée entre les internationaux et les joueurs de club.

Cunningham et al. (2016b) ont proposé une comparaison des exigences du niveau international U20 avec celui du niveau international sénior. Ils ont analysé la distance parcourue au-dessus de $18,1 \text{ km.h}^{-1}$ à chaque poste. Lorsque les auteurs ne considèrent que les groupes de postes « avants » et « arrières », ils relèvent des distances à haute intensité supérieures chez les U20 que chez les séniors, quel que soit le groupe de poste (Cunningham et al. 2016b). Lorsque les auteurs se centrent sur les postes spécifiquement, l'analyse comparative montre que les jeunes premières lignes, secondes lignes, et les jeunes joueurs du champ profond parcouraient plus de distance ($>18,1 \text{ km.h}^{-1}$) que les séniors. Alors que chez les centres, ce sont les séniors qui parcourent plus de distance à haute intensité que les U20. Aucune différence n'est observée du côté des troisièmes lignes et de la charnière (Cunningham et al. 2016b). Ceci montre que les jeunes internationaux U20 semblent prêts physiquement à répondre au haut niveau d'intensité que requiert le niveau international sénior, bien qu'une explication possible à ces résultats soit que les plus jeunes aient une plus faible maîtrise technique et tactique se traduisant par des déplacements plus nombreux (mauvais placement, contrattaque liée à une perte de balle...) et moins ordonnés. Un travail spécifique devrait être proposé aux jeunes centres afin d'améliorer leurs capacités physiques intrinsèques. Néanmoins, les auteurs notent que les U20 ayant des masses corporelles plus faibles que leurs homologues séniors, ils devront continuer leur développement en maintenant ce niveau d'exigence dans le déplacement tout en voyant leurs masses augmenter.

Lorsque l'on observe les différences d'activité à haute intensité entre le niveau professionnel et le niveau semi-professionnel, on constate que les joueurs professionnels passent plus de temps et vont plus régulièrement dans les zones de haute intensité (Sirotic et al. 2009). Aucune différence n'a été relevée sur les paramètres de sprint (distance, nombre) entre les joueurs professionnels et les semi-professionnels.

Les résultats observés par Sirotic et al. (2009), qui montrent que plus le niveau augmente, plus la part de haute intensité dans le déplacement augmente sont en contradiction avec ceux de Cunningham et al. (2016b) présentés précédemment, et qui comparent les niveaux internationaux séniors et U20. L'une des explications possibles du fait que les U20 internationaux parcourent autant voire plus de distances à haute intensité que les séniors réside dans le niveau intrinsèque de ces joueurs. Des données de vitesse maximale similaires ont été observées entre des joueurs internationaux U20 et des séniors internationaux (Barr et al. 2014). Ces jeunes joueurs sont donc à évaluer comme des joueurs élités. Contrairement à l'étude de Sirotic et al. (2009), qui compare des joueurs élités avec des joueurs semi-élités.

À un niveau national, plusieurs études ont décrit les exigences en match chez de jeunes joueurs de U16 à U20 lors de leurs compétitions domestiques (Read et al. 2017a, Read et al. 2017b, Read et al. 2018a). De ces travaux de recherche, il apparaît que plus les joueurs sont jeunes, plus la distance qu'ils parcourent à haute intensité est importante (Read et al. 2017b). Par ailleurs, Read et al. (2017a) trouvent une augmentation très probable de la distance sprintée entre les U16 (165 ± 101 m) et les U18 (319 ± 176 m), mais aucune différence relevée entre les U18 et les joueurs universitaires. Étant donné que le temps de match des U18 est de 70 min contre 80 min en universitaire, on peut conclure que les U18 semblent avoir des capacités supérieures aux joueurs universitaires. La différence observée entre les U16 et les U18 est expliquée par les auteurs comme étant influencée par des variables contextuelles du match (score, nombre de franchissements) (Read et al. 2017a), étant donné que les recherches n'ont montré aucune différence de qualité de vitesse entre les joueurs U16 et U18 (Darrall-Jones et al. 2016b). Un travail spécifique doit être apporté aux arrières U16 pour qu'ils puissent répondre aux exigences de très haute vitesse requises dans la catégorie du dessus. Pour finir, Read et al. (2018a) en comparant deux niveaux de pratique U18, a constaté que les différences entre les

joueurs du plus haut niveau (académie) et ceux du plus bas niveau (niveau scolaire) se faisaient dans la distance de jogging, donc à moyenne allure. En effet, les avants et les arrières d'académie parcourent une plus grande distance en jogging que leurs homologues (différences : $+ 25,2 \pm 16,7 \%$ et $+ 21,2 \pm 16,0 \%$ respectivement). Il est a noté que les avants d'académie parcourent également une plus grande distance sprintée que les U18 en scolaire ($+65,2 \pm 92,0 \%$) (Read et al. 2018a).

La littérature manque de données objectives caractérisant le niveau international U18. Aussi, il serait intéressant de comparer le niveau international U18 avec le niveau international U20 pour constater si des différences existent aux différents niveaux d'intensité sur ces populations élites (Read et al. 2017a, Read et al. 2017b), ou si à l'image des travaux de Cunningham et al. (2016b) peu de différences sont observées. Ces informations permettraient de donner des orientations de travail aux préparateurs physiques quant à l'intensité et aux volumes à planifier pour répondre au mieux aux exigences des matchs.

Points à retenir concernant les jeunes joueurs :

- L'activité de déplacement à haute intensité est plus importante chez les plus jeunes joueurs.
 - Les U16 ont une activité sprintée plus faible que les U18. Pas de différence observée entre les U18 et les joueurs plus âgés.
 - L'activité de déplacement à haute intensité et en sprint est plus grande chez les arrières que chez les avants.
-

Les accélérations et décélérations

Plusieurs études proposent d'analyser la donnée d'accélération et de décélération au cours du match. Nous constatons, comme pour les distances par zone d'intensité, que le choix des seuils d'accélération et de décélération est variable et que la comparaison des résultats entre études n'est pas possible. Pour autant, des tendances semblent pouvoir se dégager.

Owen et al. (2015) ont proposé l'analyse de la charge mécanique (nombre d'accélération et décélération) en match de rugby chez des séniors professionnels. Ils ont classé les accélérations de petites (1,00-1,99 m.s⁻²), moyennes (2,00-2,99 m.s⁻²) ou fortes (3,00-5,99 m.s⁻²), cette même classification miroir a été utilisée pour les décélération. Les auteurs ne relèvent aucune différence de nombre de petites accélérations et décélération entre les avants et les arrières. En revanche, ils observent que les arrières réalisent plus de moyennes accélérations et de fortes accélérations et plus de moyennes et fortes décélération que les avants. Owen et al. (2015) proposent également une analyse au poste. Ils constatent que les joueurs de première et seconde ligne sont ceux qui réalisent le moins d'accélérations et de décélération notamment dans les zones à plus forte intensité. Aucune différence n'a été observée entre les troisièmes lignes et les autres postes des lignes arrières concernant d'accélérations ou de décélération.

Ces résultats sont en cohérence avec ceux rapportés par Yamamoto et al. (2020), qui ont observé plus d'accélérations chez les arrières que chez les avants dans le championnat domestique japonais. En revanche, dans le détail au poste, ils constatent que les joueurs de deuxième ligne (piliers, d = 1,315 et N° 8, d = 1,731) et les troisièmes lignes ailes (piliers, d = 1,505 et N° 8, d = 1,868) réalisent plus d'accélérations que les piliers et les troisièmes lignes centres (N° 8). Le demi de mêlée est le joueur qui réalise le plus d'accélérations parmi les arrières (N° 10, d = 1,591 ; centres, d = 1,806 ; ailiers, d = 1,196 et arrière, d = 1,568). Concernant les accélérations les plus fortes enregistrées, les auteurs constatent que les ailiers réalisent plus d'accélérations que les arrières (d = 0,867). Dans cette étude, il n'est pas fait mention de données relatives aux décélération.

Du côté des internationaux U20, un constat relativement similaire a été fait avec un nombre d'accélérations moyennes (2-3 m.s⁻²) équivalent entre les avants et les arrières, mais un nombre d'accélérations fortes (> 3 m.s⁻²) supérieur chez les arrières que chez les avants (Cunningham et al. 2016a). Comme les résultats observés chez les séniors, les joueurs de première et seconde

ligne U20 sont ceux qui réalisent le moins d'accélération. Au niveau international U20, les arrières réalisent plus de décélérations fortes ($< -3 \text{ m.s}^{-2}$) que les avants (Cunningham et al. 2016a).

Dans une étude comparant les demandes physiques des matchs internationaux U20 avec celles des matchs internationaux séniors, on observe un nombre d'accélération moyennes ($2-3 \text{ m.s}^{-2}$) et fortes ($3-4 \text{ m.s}^{-2}$) plus grand chez les avants U20 que chez les avants séniors (Cunningham et al. 2016b). Une tendance similaire a été observée sur les décélérations réalisées par les joueurs avants, avec un nombre de fortes décélérations plus grand chez les U20, mais un nombre de très fortes décélérations ($< -4 \text{ m.s}^{-2}$) plus grand chez les séniors (Cunningham et al. 2016b). Du côté des arrières, aucune différence significative n'a été observée dans le nombre d'accélération réalisées entre les U20 et les séniors. Les auteurs rapportent que les séniors arrières réalisent plus de fortes décélérations que les U20 (Cunningham et al. 2016b).

À notre connaissance, aucune étude n'a encore traité de la demande physique en match U18 concernant la mesure du nombre d'accélération et de décélérations.

Points à retenir concernant les jeunes joueurs :

- Les U20 réalisent plus d'accélération et de décélérations que les séniors internationaux.
 - Les arrières réalisent plus d'accélération et de décélérations que les avants.
 - Les séniors (avants et arrières) réalisent plus de très fortes accélération et décélérations que les U20.
-

Le contact

L'activité combattue a également fait l'objet de plusieurs études chez les adultes (Lindsay et al. 2015a, MacLeod et al. 2018, Yamamoto et al. 2020, Tierney et al. 2021) et chez les jeunes (Roe et al. 2016b, Read et al. 2017a, Read et al. 2017b).

Lindsay et al. (2015a) ont proposé une analyse quantitative des collisions et rucks lors de matchs de joueurs professionnels de première division en étudiant les données fournies par Opta (Londres, Royaume-Uni). Les auteurs observent que les avants, et pour tous les groupes de poste, réalisent plus de collisions que les arrières ($0,56 \pm 0,23 \text{ n.min}^{-1}$ vs $0,36 \pm 0,17 \text{ n.min}^{-1}$). Aussi, ils observent que les avants, et pour tous les groupes de poste, réalisent plus de rucks que les arrières ($0,33 \pm 0,25 \text{ n.min}^{-1}$ vs $0,13 \pm 0,09 \text{ n.min}^{-1}$). Chez les avants, en fonction des postes, les auteurs rapportent entre 0,51 et 0,64 collision par minute et entre 0,28 et 0,37 ruck par minute, avec dans les deux cas un maximum réalisé par les joueurs de 3^{ième} ligne. Du côté des arrières, entre 0,31 et 0,39 collision par minute et 0,11 à 0,15 ruck par minute.

Yamamoto et al. (2020) ont évalué l'activité de combat chez les joueurs seniors japonais en analysant les impacts mesurés au GPS (SPI Pro X; GPSports Systems, Canberra, Australie) selon deux niveaux d'intensité. Les auteurs ont relevé que, quelle que soit l'intensité, les avants réalisent systématiquement plus d'impacts que les arrières. Les comparaisons entre les sous-groupes de poste ne montrent pas de différence chez les avants. Les centres réalisent plus de contacts que le n°9 ($d = 0,830$), le n°10 ($d = 0,973$) et les ailiers ($d = 0,926$). Aucune différence entre les sous-groupes de poste n'a été observée concernant les impacts les plus intenses.

À l'instar des résultats précédemment présentés, MacLeod et al. (2018) ont observé que les avants, à tous les postes, subissaient plus de collisions (quand le joueur est porteur du ballon ou non) que les arrières. Dans cette étude, les auteurs ont également donné accès à des données de charge par collision. Les résultats montrent que la charge la plus importante par collision était

subite par les ailiers et arrières. Les auteurs l'expliquent par une vitesse moyenne de ces joueurs plus importante que tous les autres groupes de poste. Les joueurs des lignes arrières ayant plus d'espace, ils auraient des vitesses plus importantes au moment de l'impact. À la différence des avants, qui sont souvent plus resserrés les uns des autres et plus proches des situations de contacts, comme les rucks.

Tierney et al. (2021) ont proposé de comparer les caractéristiques physiques de matchs seniors à différents niveaux de pratique : domestique de seconde division, domestique de première division, la Coupe d'Europe des clubs et le niveau international. Les auteurs montrent que la charge combattue est supérieure lors des rencontres internationales en sélection ou en club par rapport au niveau domestique. Ils alertent les entraîneurs sur la planification des charges d'entraînement proposées aux joueurs qui évoluent dans leur club lors de matchs du championnat domestique et/ou de Coupe d'Europe, qui partent en sélection et sont potentiellement libérés pour jouer le weekend en club. Les travaux de Tierney et al. (2021) montrent que des précautions liées à la récupération du joueur doivent être prises lorsqu'il passe d'une compétition à l'autre.

Chez les jeunes joueurs, quelques études ont étudié l'activité de combat des jeunes joueurs U18 d'académies de clubs professionnels. Roe et al. (2016b), dans leur étude de validation de l'outil GPS pour la quantification du contact, ont relevé que les avants réalisaient plus de collisions que les arrières. Cette différence était plus marquée lorsque les auteurs s'intéressaient au nombre de collisions codées par un analyste vidéo (différence standardisée : Taille de l'effet (TE) \pm 90% IC = $1,32 \pm 0,37$), que lorsqu'ils analysaient le PLslow (TE = $0,51 \pm 0,37$). Ce décalage peut être dû au fait qu'une grande partie de l'activité de déplacement des joueurs de rugby à XV se déroule à basse vitesse (Cahill et al. 2013). Par conséquent, étant donné que les avants parcourent probablement moins de distance que les arrières (Roe et al. 2016b),

l'accumulation de PLslow pendant le match chez les arrières peut résulter de plus grandes distances parcourues à des vitesses lentes et ainsi réduire la différence par rapport aux avants.

Read et al. (2017b) ont analysé l'activité de combat chez des joueurs U16, U18 et U20 d'académie de clubs professionnels, en comparant les postes et les catégories. Comme chez les adultes, les auteurs relèvent que les avants ont une activité combattue presque certainement supérieure aux arrières chez les U16 ($21,5 \pm 5,4 \%$), chez les U18 ($17,4 \pm 5,4 \%$) et chez les U20 ($22,1 \pm 5,5 \%$). Des résultats similaires ont été observés entre les groupes de poste chez Read et al. (2017a). Ensuite la comparaison au poste en fonction des catégories d'âge montre que les U18 réalisent plus de contacts que les U16 chez les avants ($7,1 \pm 5,6 \%$) et les arrières ($12,7 \pm 8,9 \%$) (Read et al. 2017b). Les U20, quant à eux, réalisent plus de contacts que les U16 chez les avants ($9,0 \pm 6,3 \%$) et les arrières ($8,2 \pm 8,7 \%$) (Read et al. 2017b). En revanche, aucune différence observée entre les U18 et les U20, quel que soit le poste (Read et al. 2017b).

Pour compléter ces observations, Read et al. (2018a) ont évalué la différence entre deux niveaux de pratique chez une population de U18 entre des joueurs d'académie de clubs professionnels par rapport à des joueurs évoluant à un niveau scolaire (niveau inférieur). Comme dans les autres études, ils renforcent le constat que les avants réalisent une charge combattue plus grande que les arrières chez les U18 d'académie ($16,2 \pm 8,2 \%$) et chez les U18 au niveau scolaire ($23,7 \pm 5,4 \%$), avec une plus grande différence observée chez les joueurs en scolaire. Ensuite, les auteurs observent chez les arrières que les joueurs d'académie ont un nombre de collisions plus grand que les joueurs d'un plus faible niveau ($11,0 \pm 7,7 \%$). Alors qu'aucune différence n'est à relever chez les avants.

Points à retenir concernant les jeunes joueurs :

- À l'unanimité des études, les avants réalisent plus de collisions que les arrières, quelle que soit la catégorie d'âge.
 - La charge combattue est plus importante chez les U18 et les U20 que chez les U16. Pas de différence observée entre les U18 et les U20.
 - Chez les séniors, l'activité combattue a été démontrée plus importante au niveau international qu'au niveau domestique. Chez les jeunes, à âge équivalent, seuls les arrières ont montré une charge combattue plus importante au plus haut niveau de pratique.
-

L'analyse globale du match représente le premier point d'entrée des études visant à améliorer la compréhension des demandes physiques liées aux matchs. Plusieurs groupes de recherche se sont attachés à décrire les exigences physiques des matchs chez les jeunes joueurs. Pour autant, il nous semble que le niveau international jeune souffre encore d'un manque de connaissances et notamment pour évaluer si les jeunes joueurs internationaux U18 sont prêts à répondre aux contraintes du niveau supérieur.

2.2.2.2. Analyse des séquences de temps de jeu effectif

L'activité physique totale liée à un match de rugby à XV, décrite dans la section précédente, commence à être de mieux en mieux connue des scientifiques et des praticiens. En revanche, les patrons de fatigue, représentés par une diminution de l'activité (diminution de la distance parcourue) ont reçu une plus faible et plus tardive attention. Des recherches ont montré que l'activité de déplacement (distance totale ou à haute intensité) n'était souvent que très peu voire pas impactée entre les mi-temps, les quarts-temps ou des intervalles d'analyse de 10-min (Roberts et al. 2008, Cunniffe et al. 2009, Lacombe et al. 2014). Suggérant ainsi que les joueurs ne ressentiraient pas de fatigue, manifestée par une diminution de la performance de

déplacement au cours du match. Pour autant, des recherches dans le rugby à 7 d'élite (Granatelli et al. 2014, Peeters et al. 2019), le rugby à XII (Kempton et al. 2015) ou le rugby à XV (Lacome et al. 2017) examinant des périodes spécifiques du match, comme les derniers instants de jeu par rapport au début du match, ont observé des fluctuations dans la performance. Lacome et al. (2017) ont observé que la distance parcourue à haute intensité, normalisée au temps de jeu effectif, dans les dix dernières minutes du match diminuait significativement par rapport aux dix premières minutes (-18% chez les avants, et -17% chez les arrières), alors que les performances techniques ne présentaient pas de différences en fréquence ou qualité de réussite entre les deux périodes. Ce qui valide l'intérêt de disséquer le match en différentes tranches de temps ou phase de jeu (comme l'attaque et la défense (Lacome et al. 2017, Tierney et al. 2017)) pour l'analyser plus finement.

Plusieurs études ont alors proposé d'analyser le match seulement quand le ballon était en jeu (temps de jeu effectif). En effet, Quarrie et al. (2013) observaient, de façon assez logique, que la distance totale parcourue pendant le match était « surestimée » par rapport à la distance parcourue lorsque le ballon était en jeu. Les auteurs rapportent ainsi que les piliers parcourent en moyenne 5500 m pendant le match, dont 3700 m quand le ballon est en jeu. Ceci étant évidemment expliqué par un temps de jeu effectif plus faible que le temps d'arrêt de jeu total. Quarrie et al. (2013) ont mesuré un temps de jeu effectif de 36:21 ± 2:40 min:s contre 53:34 ± 5:27 min:s de temps de pause.

La part de temps de jeu effectif, par rapport au temps de jeu total, a grandement évolué depuis la fin des années 1980 et plus largement à partir du professionnalisme (Eaves and Hughes 2003, Eaves et al. 2005). Le pourcentage de temps de jeu effectif a augmenté de 26,0 %, 26,9 %, 31,2 % à 33,1 % entre 1988-1992, 1993-1995, 1996-1999 et 2000 et plus (Eaves and Hughes 2003). Entre les années 1988-1992 et 2000, Eaves et al. (2005) ont observé une augmentation du temps de jeu effectif en minutes d'environ 45 %, passant de 21,2 min à 30,7 min. Des données qui

n'ont fait que croître depuis, notamment au niveau international, puisque selon les rapports d'analyses des matchs des Tournois des 6 nations fournis par World Rugby, en 2016 le temps de jeu effectif était de 36:19 min:s et il est monté jusqu'à 40:37 min:s en 2018 (WorldRugby 2019). Pour compléter l'analyse du temps de jeu effectif, plusieurs études ont cherché à comprendre comment se distribuaient les temps d'effort et de récupération, au travers d'un ratio travail:récupération (T:R) (Cunniffe et al. 2009, Austin et al. 2011, Lacomme et al. 2014). Chez des joueurs séniors élités, on a relevé un ratio moyen T:R de 1:5,7 tous postes confondus, avec une distinction de 1:5,8 chez les avants, et de 1:5,7 pour les arrières (Cunniffe et al. 2009). Plus précisément, Austin et al. (2011) ont proposé d'évaluer ce ratio sur des groupes de postes plus ciblés et déjà utilisés précédemment dans la littérature (Duthie et al. 2005), à savoir le cinq de devant sans les talonneurs (joueurs n° 1, 3, 4, 5), les troisièmes lignes et le talonneur (joueurs n° 2, 6, 7, 8), les centres et l'ouvreur (joueurs n° 10, 12, 13) et le troisième rideau (joueurs n° 11, 14, 15), le demi de mêlée n'étant pas inclus à l'étude. Dans l'ordre des groupes cités, les auteurs relèvent des ratios T:R de 1:1,4, 1:1,4, 1:1,5 et 1:1,6 respectivement (Austin et al. 2011). Pour compléter cette analyse, Lacomme et al. (2014) ont évalué action par action le ratio T:R en le caractérisant comme étant inférieur à 1:4 ($T:R < 1:4$), compris entre 1:4 et 1 ($1:4 < T:R < 1$) et supérieur à 1 ($T:R > 1$). Les auteurs observent que, pour les mêmes groupes que précédemment décrit, les troisièmes lignes et talonneur effectuent significativement plus de $T:R > 1$ que le cinq de devant ou les joueurs du troisième rideau, ces derniers sont ceux qui en effectuent le moins. Les ailiers et arrières effectuent significativement plus de $T:R < 1:4$ que les autres groupes.

Certains auteurs se sont ensuite attachés à présenter plus précisément le déplacement des joueurs lorsque le ballon était en jeu, sur des phases spécifiques comme l'attaque (Tierney et al. 2017) ou plus largement selon différentes tranches de temps (Reardon et al. 2017b, Pollard et al. 2018).

Ainsi Tierney et al. (2017) ont analysé le déplacement des joueurs professionnels en attaque lorsqu'ils entraient dans la zone des 22-m adverse. Ils observent que pour tous les groupes de poste, la distance totale et à haute intensité parcourue est supérieure lors de ces phases de jeu comparées à l'intensité moyenne du match. Ils relèvent des données de distance relative allant de $97,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ à $121,0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ dans les 22-m, contre $63,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ à $81,8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ sur le match complet. Aussi, les auteurs ont caractérisé l'entrée dans les 22-m comme étant « à succès » (si un essai était marqué, une pénalité accordée, un drop marqué, ou toute conservation de la possession) ou « sans succès » (si la possession était perdue : turn over, pénalité concédée, en avant ou touche). Ils montrent que lors des entrées à succès dans les 22-m, les avants parcouraient plus de distance en sprint par rapport aux phases sans succès ($3,6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ contre $1,8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$). Suggérant, donc d'intéressantes prescriptions pour les entraîneurs, à savoir que lors des entraînements spécifiques dans la zone de marque (zone des 22-m), il était primordial de stimuler les avants afin qu'ils parcourent la plus grande distance en sprint possibles. Pour autant, il est à noter que le temps passé dans les 22-m adverses est plutôt faible (en moyenne, moins de 3 min par match pour le XV de France lors du tournoi des 6 nations 2022, données internes) à l'échelle d'un match donc les applications pratiques restent limitées.

Reardon et al. (2017b) ont utilisé une autre approche pour caractériser l'activité des joueurs professionnels pendant le temps le jeu effectif. Ils ont identifié sur 17 matchs d'élite sénior, les séquences de temps de jeu les plus longues pour chaque joueur avant de les caractériser sur le déplacement et l'activité combattue (nombre de collisions). Les auteurs identifient des séquences allant de 152 s à 161 s, avec les séquences les plus longues pour les joueurs du 5 de devant. Associées à ces durées de séquences, les distances relatives rapportées sont de l'ordre de 109 à $124 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, les arrières, quel que soit leur poste parcourent une distance relative plus grande que les avants. Des informations concernant la haute intensité sont également apportées.

Les joueurs de première et seconde ligne (sans les talonneurs inclus au groupe des troisièmes lignes) sont ceux qui parcourent le moins de distance à haute intensité ($4,9 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$), derrière les troisièmes lignes (plus le talonneur) ($6,0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$), les 10-12 ($8,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$) et les 13-11-14-15 ($14,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$). Statistiquement, la seule différence avérée concerne la distance à haute intensité des 13-11-14-15 avec tous les autres groupes de poste. Pour finir, Reardon et al. (2017b) ont observé un nombre de collisions (rapporté à la minute) plus grand chez les avants (5 de devant : $0,73 \text{ n}\cdot\text{min}^{-1}$; 3^{ème} ligne : $0,89 \text{ n}\cdot\text{min}^{-1}$) par rapport aux arrières (10-12 : $0,28 \text{ n}\cdot\text{min}^{-1}$; 13-11-14-15 : $0,41 \text{ n}\cdot\text{min}^{-1}$). Pas de différence n'a été relevée au sein des groupes de poste des avants et des arrières. Les données de distance relative rapportées par Reardon et al. (2017b), donc sur des durées d'environ 2 min 30, sont similaires aux séquences maximales de 3 à 4 min glissantes analysées par Delaney et al. (2017b). Ce qui met en évidence que l'analyse des séquences de temps de jeu effectif aura encore tendance à sous-estimer les intensités maximales que peuvent vivre les joueurs en match.

Une autre analyse du déplacement et de l'activité combattue lors de séquences de temps de jeu effectif classées selon différentes durées (30-60 s, 61-90 s, >90 s) a été proposée lors de matchs internationaux (Pollard et al. 2018). Les auteurs constatent que chez les avants les séquences de déplacement les plus intenses sont les séquences de 30-60 s, avec une distance relative de $106,9 \pm 5,6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ et une distance à haute intensité relative de $10,9 \pm 4,7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Les arrières quant à eux, parcourent les plus grandes distances absolues lors des fenêtres de temps de 61-90 s ($115,1 \pm 11,4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$), significativement supérieures aux avants ($104,6 \pm 6,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$), alors que la distance à haute intensité la plus importante est réalisée sur les séquences les plus courtes ($20,3 \pm 5,7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$). L'analyse du nombre de collisions réalisées lors des différentes séquences de temps de jeu effectif montre que les avants réalisent significativement plus de contacts que leurs partenaires des lignes arrières. Quel que soit le poste, aucune différence n'est observée

dans le nombre moyen de contacts en fonction de la durée des séquences (avants : $1,1 \pm 0,2 \text{ n.min}^{-1}$; arrières : $0,5 \pm 0,1 \text{ n.min}^{-1}$).

À notre connaissance, une seule étude a proposé une analyse de l'activité des jeunes joueurs U18 lors de séquences bien identifiées du jeu (Read et al. 2018b). Les auteurs ont caractérisé spécifiquement les phases d'attaque et de défense sur des tranches de temps de 0-15 s, 16-30 s, 31-45 s, 46-60 s et >60 s. Ils ont constaté une durée moyenne équivalente des séquences d'attaque ($26 \pm 17 \text{ s}$) et de défense ($26 \pm 18 \text{ s}$). Ils observent également que les joueurs parcourent plus de distance lors des séquences d'attaque que les séquences de défense. Aussi, ils relèvent qu'en défense les avants parcourent possiblement voire très probablement plus de distance que les arrières. Les données présentées sont relativement similaires à celles avancées par Tierney et al. (2017) dans ces travaux analysant la phase d'attaque des 22-m. Comme pour Tierney et al. (2017), les distances observées par Read et al. (2018b) sont sous-estimées par rapport aux déplacements liés aux séquences glissantes maximales (Read et al. 2019). L'activité de combat, mesurée par le GPS au moyen du paramètre de PlayerLoad (PL), a été démontrée plus grande chez les avants que chez les arrières en attaque comme en défense.

Cette méthodologie d'analyse apporte une information d'intensité supérieure à l'analyse globale présentée dans la section précédente. En effet, les résultats de Pollard et al. (2018) montrent bien une augmentation de l'intensité moyenne des déplacements entre l'analyse du match complet ($67,6 \pm 4,8 \text{ m.min}^{-1}$) et l'intensité moyenne des séquences de temps de jeu effectif ($108,6 \pm 8,5 \text{ m.min}^{-1}$). Un constat équivalent observé sur l'activité combattue (match complet : $0,4 \pm 0,2 \text{ n.min}^{-1}$; moyenne des séquences de temps de jeu effectif : $0,8 \pm 0,3 \text{ n.min}^{-1}$). Pour autant, nous constatons que cette méthodologie, bien que de plus en plus utilisée, est encore peu employée. Cela étant sans doute expliqué par une procédure assez longue à mettre en place. Il s'agit de synchroniser le codage réalisé par les analystes vidéos avec le flux GPS. Heureusement, la technologie progressant sans cesse, ce process est de plus en plus facile à

appliquer pour permettre d'utiliser l'analyse des séquences de temps de jeu effectif comme routine d'analyse post-match ou entraînement.

Par ailleurs, Cunningham et al. (2018a) ont comparé les intensités de déplacement (distance relative et distance HI) lors de séquences de temps de jeu effectif de différentes durées avec des séquences maximales mesurées avec la méthodologie des moyennes glissantes. Ils ont ainsi évalué que la méthode des moyennes glissantes surestimait significativement l'intensité de déplacement (de distance relative et à HI) par rapport aux séquences fixes. Justifiant ainsi l'utilisation d'une nouvelle méthode complémentaire à l'analyse globale et l'analyse des séquences de jeu.

Points à retenir concernant l'analyse des séquences de temps de jeu effectif :

- Le déplacement observé sur les périodes de temps de jeu effectif est surestimé par rapport à l'analyse du déplacement moyen pendant le match.
 - Chez les séniors, la DR parcourue lors des séquences de temps de jeu effectif est plus grande chez les arrières que les avants. Les 13-11-14-15 parcourent plus de distance à HI que les autres groupes de poste. Les avants réalisent plus de contacts que les arrières.
 - Chez les jeunes, seule une étude a analysé le déplacement des joueurs lors des séquences de temps de jeu effectif. Il a été démontré que les avants parcourent plus de distance relative que les arrières en défense. Aucune différence entre les postes en attaque.
-

2.2.2.3. Analyse des séquences maximales d'activité

On a vu dans les sections précédentes que le match pouvait être analysé au moyen de différentes méthodes : analyse du match complet (Quarrie et al. 2013, Read et al. 2018a), analyse par mi-temps (Lacome et al. 2017), par tranches de temps régulières (Roberts et al. 2008), une analyse des séquences du temps de jeu effectif total (Reardon et al. 2017b, Pollard et al. 2018) ou de séquences spécifiques comme l'attaque ou la défense (Tierney et al. 2017, Read et al. 2018b).

Ces études ont révélé être complémentaires dans la compréhension des intensités imposées par les matchs de rugby à XV.

Afin d'améliorer encore la compréhension des niveaux d'intensité les plus extrêmes que peuvent vivre les joueurs indépendamment des phases de temps de jeu effectif ou de récupération, de nouvelles méthodes ont émergé avec l'utilisation des moyennes glissantes (Varley et al. 2012a). Les chercheurs ont utilisé les données brutes de vitesse instantanée mesurée par le GPS, à savoir tous les points correspondant à la fréquence d'acquisition. C'est-à-dire que pour un GPS 10 Hz, et une session d'une heure, le GPS mesure 10 points par seconde pendant 60 minutes, donc le GPS aura mesuré 36 000 points lors de la session. De ces données brutes de vitesse instantanée, une moyenne glissante d'une fenêtre de durée variable va être affectée pour évaluer la séquence où l'intensité sera la plus élevée.

Cette méthode a été utilisée dans d'autres sports de contact (Delaney et al. 2015, Delaney et al. 2017a) et de non-contact (Delaney et al. 2017c). Delaney et al. (2017a) ont étudié les intensités de déplacement en fonction de différentes durées chez 40 joueurs de football australien lors de 30 matchs. De même, Delaney et al. (2015) ont évalué 32 joueurs de rugby à XIII au cours d'une saison du championnat de première division de rugby à XIII australienne. Cette méthode a également été appliquée à un sport sans contact, le football, où les 40 matchs de 24 joueurs professionnels australiens ont été étudiés (Delaney et al. 2017c). Les trois études ont identifié les pics d'intensité sur des fenêtres de temps allant de 15 secs à 10 minutes dans leurs sports respectifs. Bien que la méthode se démocratise et que des recherches aient été menées dans différents sports, il existe peu d'études consacrées au rugby à XV (Delaney et al. 2017b, Cunningham et al. 2018a, Owen 2019, Read et al. 2019). Les applications pratiques de résultats provenant de séquences maximales d'une durée inférieure à une minute n'étant pas concrètes pour l'entraînement, la majorité des études ne s'intéresse qu'aux séquences supérieures à une minute (Delaney et al. 2017b, Cunningham et al. 2018a, Owen 2019). L'analyse des périodes

pics fournit un outil où les intensités des séances d'entraînement peuvent être prescrites et évaluées pour essayer de coller aux périodes pics de match. Delaney et al. (2017a) suggèrent que si un joueur n'est pas en mesure de faire face aux demandes maximales du match dans un contexte d'entraînement, un entraînement spécifique isolé pourrait lui être proposé afin d'augmenter sa capacité de déplacement.

Delaney et al. (2017b) ont évalué les intensités pics de 1 à 10 minutes en analysant la distance relative (Figure 2.6) et le nombre moyen d'accélération associées (Figure 2.7) chez des séniors internationaux de rugby à XV. Ils se sont attachés à caractériser l'évolution de ces paramètres dans le temps ainsi qu'à différencier les profils de postes (5 de devant, 3^{èmes} lignes, les demis et les centres, ailiers et arrières). D'abord, ils observent comme dans la littérature précédemment citée (Delaney et al. 2015, Delaney et al. 2017a, Delaney et al. 2017c), que plus la fenêtre d'analyse est courte et plus les performances de déplacement (distance relative ou accélérations) sont importantes. En effet, comparée à la fenêtre de 10-min, la distance relative était à minima certainement plus grande pour toutes les durées inférieures à 8-min. Un constat identique pour le nombre moyen d'accélération qui est systématiquement supérieur pour les fenêtres de moins de 7-min comparé à la fenêtre de 10-min. L'analyse au poste met en évidence des différences dans l'activité de déplacement. Les auteurs rapportent des augmentations petites à modérées de la distance relative chez les arrières et les 3^{èmes} lignes par rapport au 5 de devant pour chaque fenêtre de temps. Les n°9 et n°10 sont exposés à une distance relative plus importante par rapport aux centres, ailiers et arrières et aux 3^{èmes} lignes entre 1- et 8-min. (TE = 027 – 0,41). Aussi, les résultats montrent que les joueurs du 5 de devant réalisent un nombre d'accélération moyen inférieur aux 3^{èmes} lignes, aux demis et aux centres, ailiers et arrières, quelle que soit la durée. Aucune différence observée entre les 3^{èmes} lignes et tous les arrières. Pour finir, l'analyse a montré pour tous les paramètres et les fenêtres de temps une activité similaire entre les 3^{èmes} lignes et le groupe des centres, ailiers et arrières.

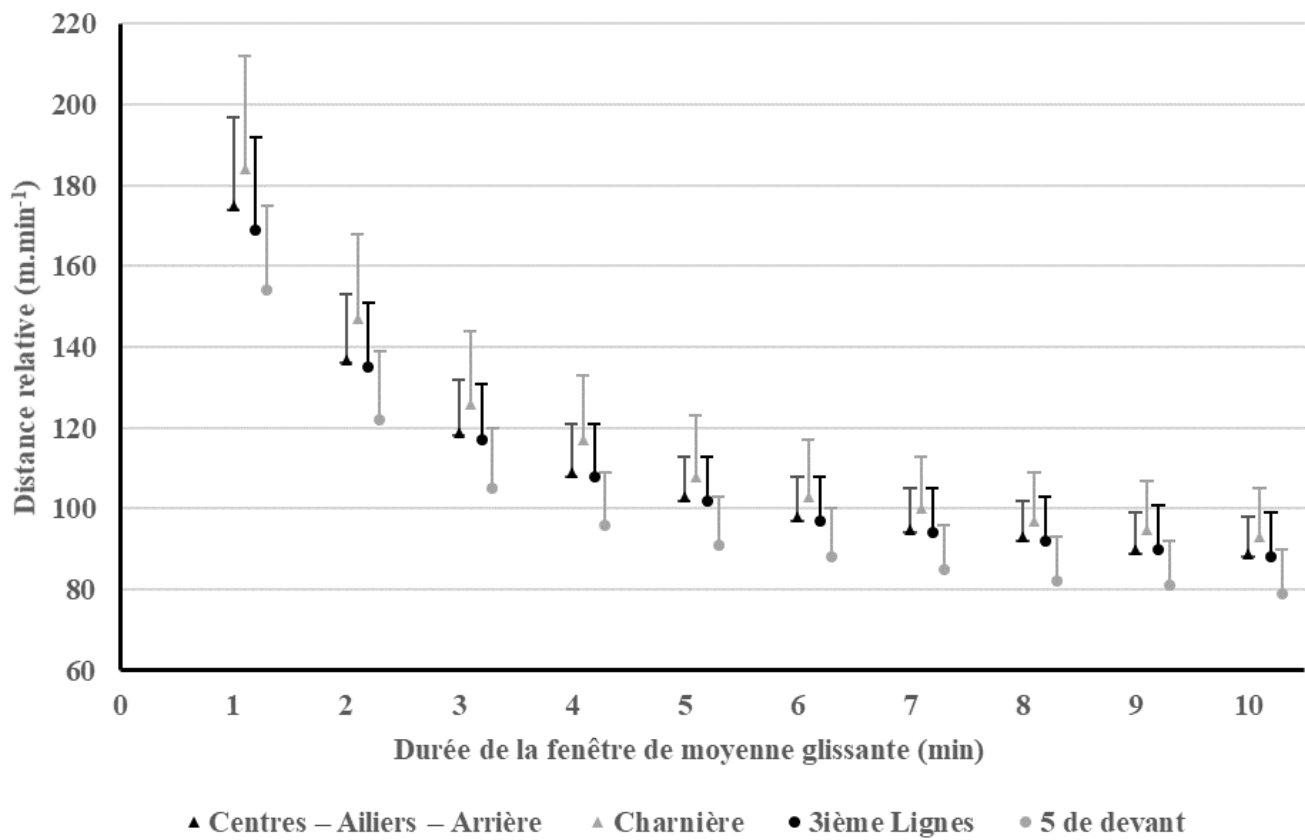


Figure 2.6 : Distances relatives réalisées par groupe de poste sur des périodes maximales d'activités allant de 1- à 10-min. D'après les travaux de Delaney et al. (2017b).

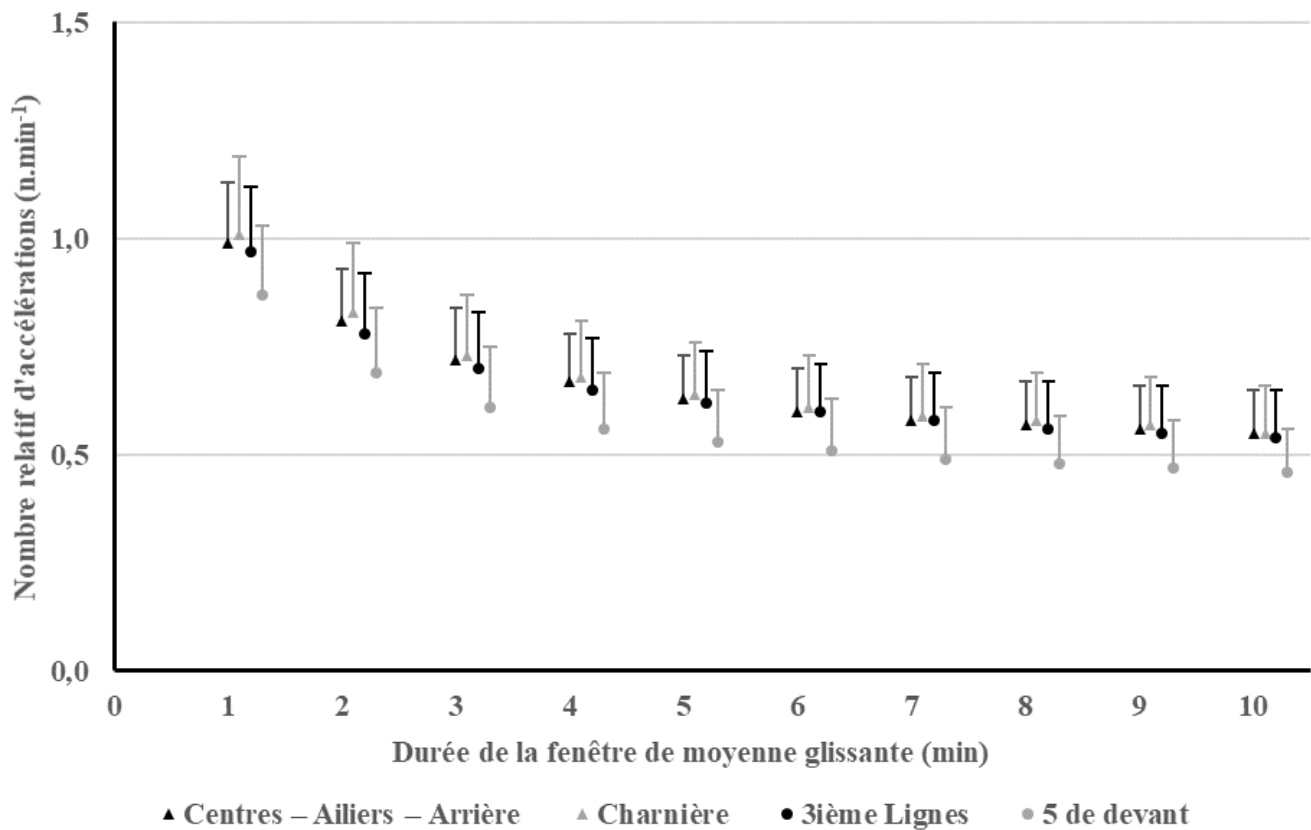


Figure 2.7 : Nombre relatif d'accélération réalisées par groupe de poste sur des périodes maximales d'activité allant de 1- à 10-min. D'après les travaux de Delaney et al. (2017b).

Les résultats de l'étude de Cunningham et al. (2018a) (Figure 2.8) chez des séniors internationaux sont identiques à ceux rapportés par Delaney et al. (2017b). À savoir que sur les durées de séquences maximales analysées (de 1- à 5-min), l'intensité de déplacement diminue avec l'augmentation de la durée et que pour chaque fenêtre de temps, les arrières parcourent une distance relative significativement supérieure à celle des avants. Les auteurs ont proposé l'analyse d'une variable complémentaire : la distance HI. Les tendances observées sont similaires à la distance relative. Les avants parcourent une distance HI allant de 42,5 m.min⁻¹ à 13,1 m.min⁻¹ entre 1- et 5-min, alors que chez les arrières la distance HI évolue de 69,9 m.min⁻¹ à 24,0 m.min⁻¹ entre 1- et 5-min.

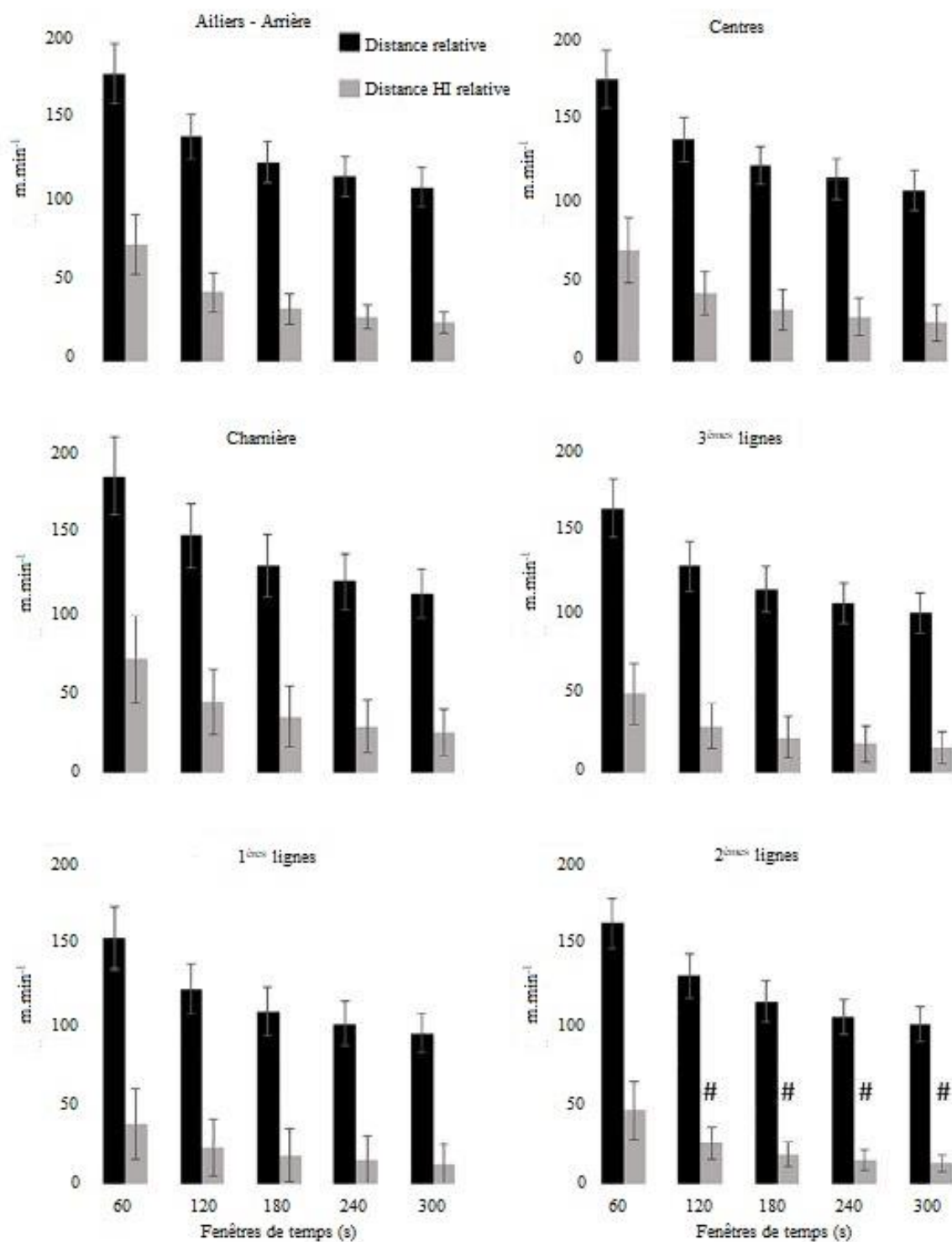


Figure 2.8 : DR et distance HI relative sur des périodes pic d'activité allant de 60 à 300 s. D'après les travaux de Cunningham et al. (2018a), # différence significative par rapport aux 1^{ères} lignes.

Owen (2019) a proposé une analyse de la distance relative ainsi que du nombre de contacts par minute sur des séquences allant de 1 à 10 minutes chez des joueurs professionnels de première division (Figure 2.9). Ils ont observé chez les avants une diminution minute par minute jusqu'à la 6^{ème} minute, allant de 138 m.min⁻¹ à 87 m.min⁻¹. Chez les arrières, la diminution observée allait de la minute une à la minute sept, avec des données de déplacement allant de 157 m.min⁻¹ à 93 m.min⁻¹. Les auteurs observent que les avants, quel que soit le poste, se déplacent à une intensité plus faible que les arrières sur chaque durée d'analyse. En revanche, à la différence des résultats présentés par Delaney et al. (2017b), Owen (2019) n'observent aucune différence entre les intensités de déplacement des joueurs du 5 de devant et des 3^{èmes} lignes et entre les groupes de postes d'arrières respectivement. Les distances relatives relevées par Owen (2019) chez des joueurs professionnels de première division semblent être plus faibles que les distances rapportées par Delaney et al. (2017b) et Cunningham et al. (2018a) chez des joueurs internationaux. Mettant en avant un jeu plus rapide au niveau international qu'au plus haut niveau domestique.

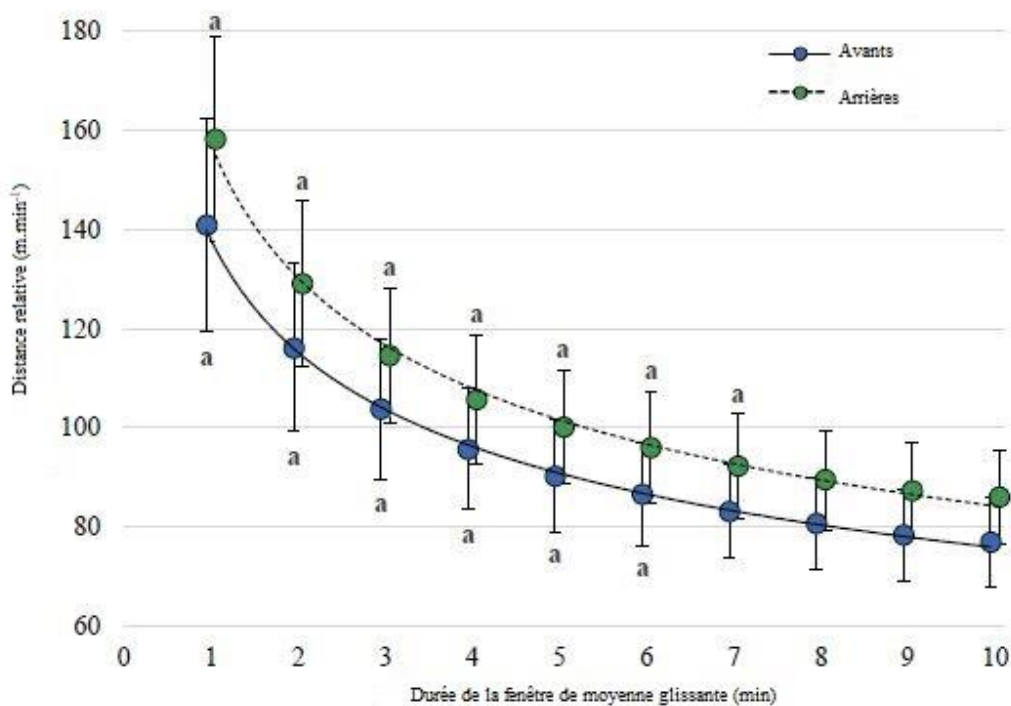


Figure 2.9 : Distances relatives réalisées par les avants et les arrières sur des périodes maximales d'activités allant de 1- à 10-min. D'après les travaux de Owen (2019).

L'originalité de l'étude d'Owen (2019) réside dans une analyse de l'activité maximale de contact (Figure 2.10). Ils observent que les avants réalisent plus de contacts que les arrières. Entre les minutes 1 et 6, la fréquence des contacts diminue significativement minute par minute chez les avants, partant de 2,9 contacts par minute pendant sur 1-min pic jusqu'à 1,3 contact par minute sur 6-min pic. Aucune différence n'a été mesurée entre les joueurs du 5 de devant et les 3^{èmes} lignes. Chez les arrières, la fréquence des contacts diminue de 1-min, avec 2,0 n.min⁻¹, à 5-min avec 0,7 n.min⁻¹. La comparaison entre les sous-groupes d'arrières met en avant que les demis et les centres réalisent plus de contacts que les ailiers et arrières (1-min : 2,0 vs 1,9 n.min⁻¹ ; 5-min : 0,8 vs 0,6 n.min⁻¹ ; 10-min : 0,5 vs 0,4 n.min⁻¹). La tendance observée de ces résultats va dans le sens de ceux de Pollard et al. (2018), qui voyaient les avants réaliser

plus de contacts que les arrières sur toutes les fenêtres de temps de jeu effectif étudiées. Malgré tout, les données rapportées chez Owen (2019) sont presque deux à trois fois supérieures sur les séquences maximales que sur le temps de jeu effectif.

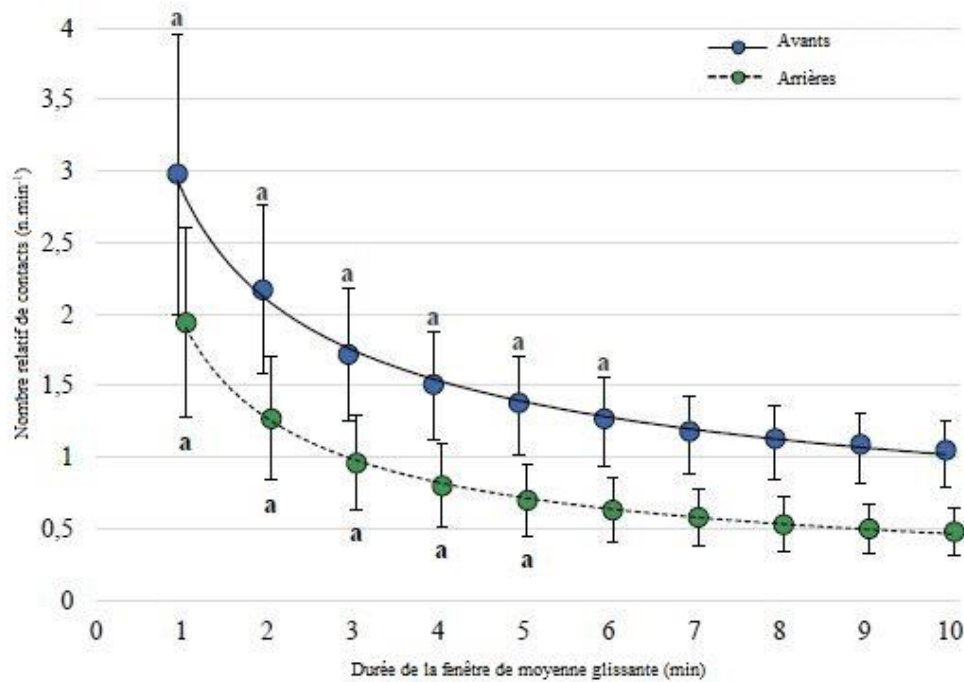


Figure 2.10 : Nombre relatif de contacts réalisés par les avants et les arrières sur des périodes maximales d'activité allant de 1- à 10-min. D'après les travaux de Owen (2019).

L'étude de Read et al. (2019) est à notre connaissance la seule à avoir évalué les intensités maximales de déplacement lors de matchs U18 de joueurs d'académies de clubs professionnels anglais. Les auteurs ont analysé la distance relative mesurée à l'aide de la méthode des moyennes glissantes sur des séquences de 15-s, 30-s, 1-, 2-, 2,5-, 3-, 4-, 5- et 10-min. Comme chez les séniors, ils ont observé des différences presque certaines entre chaque minute consécutive, la distance relative a diminué chez les avants et les arrières à mesure que la durée

d'analyse augmentait. Aussi, comme chez les séniors, ils relèvent que pour toutes les périodes de temps analysées, la distance relative était presque certainement plus faible chez les avants que chez les arrières (Taille de l'Effet (TE) \pm Intervalle de Confiance (IC) = $-1,19 \pm 0,21$ (15-s) ; $-1,18 \pm 0,24$ (30-s) ; $-0,85 \pm 0,24$ (1-min) ; $-0,74 \pm 0,21$ (2-min) ; $-0,82 \pm 0,21$ (2,5-min) ; $-0,83 \pm 0,22$ (3-min) ; $-0,90 \pm 0,24$ (4-min) ; $-0,84 \pm 0,24$ (5-min) et $-0,84 \pm 0,23$ (10-min)). Les comparaisons aux postes montrent des intensités de déplacement très probablement voire presque certainement plus grandes chez les 2^{ndes} lignes et les 3^{èmes} lignes que chez les joueurs de 1^{ère} ligne, pas de différence observée entre les 2^{ndes} lignes et les 3^{èmes} lignes. Dans cette étude, les arrières ont été séparés en trois groupes : le demi de mêlée, l'ouvreur et les centres et les ailiers et l'arrière. Les auteurs relèvent qu'à partir de 30s le demi de mêlée parcourt probablement ou presque certainement plus de distance que les autres postes. Aucune différence significative n'a été observée entre les groupes « ouvrier et centres » et « ailiers et arrière ». Les données rapportées par Read et al. (2019) semblent similaires aux données déjà présentées chez des séniors internationaux (Delaney et al. 2017b, Cunningham et al. 2018a). Aussi, d'importants changements anthropométriques (taille et poids) entre la catégorie U18 et le niveau professionnel (Darrall-Jones et al. 2015, Darrall-Jones et al. 2016b, Jones et al. 2018) et qu'il sera important de poursuivre le travail de développement des joueurs (aérobie notamment) pour qu'ils soient en mesure de maintenir voire augmenter les performances rapportées à des niveaux supérieurs.

La revue de littérature concernant l'analyse des séquences maximales d'activité, déplacement ou contact, montrent des tendances relativement similaires aux patrons d'activité présentés grâce à l'analyse du match complet ou des séquences de temps de jeu effectif. Pour autant, on constate que très peu d'études ont utilisé la méthode des moyennes glissantes dans le rugby à XV, avec seulement une seule sur la catégorie jeune d'un championnat domestique. Aucune étude n'a encore étudié le niveau international U18 ou U20. La richesse des données récoltées

grâce aux séquences maximales d'activité pour la programmation de l'entraînement nous pousse à orienter des recherches dans ce sens pour caractériser le niveau international jeune.

Points à retenir concernant l'analyse des séquences maximales d'activité :

- Les séquences maximales d'activité, mesurées avec la méthode des moyennes glissantes de fenêtres de temps variables, ont démontré de plus grandes intensités de course et de fréquence d'actions d'accélération ou de contacts que l'analyse des séquences de temps de jeu effectif.
 - Lors des séquences maximales d'activité, les intensités de courses et la fréquence des accélérations sont plus grandes chez les arrières que chez les avants, quelle que soit la fenêtre de temps.
 - Une plus grande fréquence de contact est observée chez les avants que chez les arrières.
-

La revue de la littérature concernant les demandes physiques en match a montré un large éventail d'outils allant d'observations les plus larges en analysant le match dans sa globalité ou par mi-temps, à des moyens de plus en plus fins de caractériser l'intensité, d'abord en analysant de façon isolée les séquences de jeu vécues par le joueur, puis en appliquant la méthode des moyennes glissantes pour analyser réellement ce qu'a pu vivre le joueur, sans prendre en compte les temps de pause du match. Cette revue a fourni des informations pertinentes chez les catégories de jeunes joueurs sur certains types d'analyses (Cunningham et al. 2016a, Read et al. 2018b, Read et al. 2019). Il nous semble malgré tout que des études complémentaires devraient venir alimenter la connaissance sur ces catégories.

Aussi, pour des aspects très pratiques liés à la gestion de la reprise de l'entraînement des joueurs après un match, il semble capital pour l'entraîneur ou le préparateur physique de connaître l'impact des exigences physiques du match, précédemment décrites, sur la fonction neuromusculaire, sur l'homéostasie biologique et au sens large sur l'état de forme du joueur pour évaluer les niveaux de fatigue post-match et ainsi adapter la charge d'entraînement.

2.3. L'ANALYSE DE LA FATIGUE POST-MATCH

2.3.1. Les mécanismes de la fatigue

La fatigue est un phénomène complexe impliquant des mécanismes centraux, périphériques et cognitifs (Ishii et al. 2014). La distinction anatomique entre la fatigue centrale et périphérique peut se faire au niveau de la jonction neuromusculaire. En effet, tout phénomène survenant en amont de la jonction neuromusculaire caractérise la fatigue centrale alors que tout ce qui se situe en aval représente les mécanismes périphériques de la fatigue (Gandevia 2001).

Plus précisément, la fatigue centrale est définie comme une diminution de la contraction maximale volontaire induite par l'exercice, qui ne s'accompagne pas de la même réduction de la force maximale évoquée (Vøllestad 1997, Gandevia 2001). Cette fatigue centrale peut être expliquée par des mécanismes spinaux et supraspinaux. En effet, il a été mis en évidence une diminution de l'excitabilité du cortex moteur au cours de l'exercice (Gandevia 2001). Les origines de la fatigue périphérique sont liées à une diminution des propriétés contractiles de la fibre musculaire ainsi qu'à une altération de la transmission du potentiel d'action de la jonction neuromusculaire au réticulum sarcoplasmique (Gandevia 2001).

Cependant, la définition de la fatigue et sa catégorisation en composantes périphériques ou centrales semblent restreintes (Enoka and Duchateau 2016, St Clair Gibson et al. 2018). La plupart des arguments proviennent de la définition réductrice de la fatigue ne la considérant que comme une diminution de la production de force ou une incapacité à maintenir un niveau de force donné. Il semble néanmoins que tous s'accordent sur l'importance des aspects subjectifs et, dans une autre mesure, sur l'implication du cerveau dans ce qui conduit à un état de fatigue. Par exemple, Enoka and Duchateau (2016) ont décrit la fatigue comme "des réductions des fonctions physiques et cognitives qui vont d'une altération de la performance motrice induite par l'exercice à des sensations de fatigue et de faiblesse qui accompagnent certains états cliniques". Bien que les auteurs n'y fassent pas clairement référence, on peut alors parler de

fatigue mentale (Marcora et al. 2009). La fatigue mentale est un état psychobiologique causé par des périodes prolongées d'activités cognitives exigeantes (Russell et al. 2019a, Russell et al. 2019b). Cet état de fatigue particulier entraîne une diminution de la motivation (Boksem and Tops 2008), de la fonction cognitive (perturbations dans le processus de prise de décision) (Van der Linden et al. 2003) et une augmentation de la perception de l'effort (Marcora et al. 2009).

L'augmentation et l'enchaînement du nombre de rencontres dans les sports collectifs professionnels ont amplifié la nécessité de surveiller l'état de forme des joueurs (Carling et al. 2018). Pour cela, les entraîneurs se donnent la possibilité d'adapter les contenus d'entraînement pour chaque joueur, le but étant d'améliorer les performances et de diminuer le risque de blessure (Taylor et al. 2012). La compréhension des réponses (forme physique ou fatigue) d'un joueur à la dose exposée (entraînement ou match) est importante pour assurer une performance optimale (Banister et al. 1975). Dans le contexte des rencontres hebdomadaires, il est recommandé d'établir un bilan de l'état des joueurs dans les 3 jours suivant les matchs, ces recommandations prenant en compte que des variations individuelles sont à prévoir avec certains joueurs qui auront récupéré après 48h, quand 96h seront nécessaires pour d'autres (Carling et al. 2018). L'état de forme du joueur se définit alors comme la variation observée (augmentation ou diminution) de la mesure d'une composante de la fatigue après l'exposition à un stimulus d'exercice (entraînement ou match) censé induire des perturbations physiologiques et psychologiques par rapport à la valeur initiale recueillie dans des conditions contrôlées.

Les manifestations connues de la fatigue post-match ont été bien décrites dans la littérature dans le rugby (Tavares et al. 2017). Elles englobent une altération de la fonction neuromusculaire, des lésions musculaires, une inflammation, des perturbations hormonales, des troubles psychologiques, un épuisement du glycogène, une fatigue mentale, des modifications du système nerveux autonome et une déshydratation. D'après une enquête menée dans le sport de haut niveau, les mesures subjectives (questionnaire) et les tests de saut sont les plus

fréquemment utilisées dans les sports de collisions, ainsi que des tests sous maximaux en course à pied ou vélo et des tests spécifiques aux sports, mais non décrits (Taylor et al. 2012). Ce qui est en cohérence avec les tests utilisés dans la littérature spécifique au rugby (West et al. 2014, Lacombe et al. 2018, Ramírez-López et al. 2020b).

2.3.2. L'évaluation de la fatigue

2.3.2.1. La fonction neuromusculaire

La fonction neuromusculaire est l'une des principales facettes de la fatigue évaluée régulièrement dans le sport de haut niveau (Taylor et al. 2012). La fatigue neuromusculaire est définie comme une réduction de la force ou de la puissance induite par l'exercice, que la tâche puisse être maintenue ou non (Enoka and Duchateau 2008). Dans un contexte écologique, lié à l'entraînement d'athlètes de sports de collision, la principale méthode d'évaluation de terrain de la fonction neuromusculaire du bas du corps utilisée dans la littérature est le CMJ (Cormack et al. 2008, McLean et al. 2010, McLellan et al. 2011b, Taylor et al. 2012, West et al. 2014), tandis que la fonction neuromusculaire du haut du corps est très souvent mesurée à l'aide de pompes pliométriques (Johnston et al. 2013a, Johnston et al. 2015). Nous notons le caractère réducteur des tests de terrain comme évaluation de la fonction neuromusculaire du fait de la complexité des mouvements (mouvements polyarticulaires, de multiples groupes musculaires sollicités...), et nous ne pouvons pas affirmer évaluer la fonction neuromusculaire pure, mais une expression de ses qualités dans un contexte écologique spécifique. Dans ce travail de thèse, nous nous centrerons sur les évaluations du bas du corps.

Pour entrer dans les aspects méthodologiques, Roe et al. (2016a) ont d'abord proposé une étude de fiabilité entre les jours des marqueurs de la fatigue sur une population de jeunes joueurs U18 d'académies de clubs professionnels anglais (Roe et al. 2016a). Pour évaluer la fonction

neuromusculaire du bas du corps, les auteurs ont utilisé les CMJ, lors desquels ils ont mesuré la hauteur de saut, le temps de vol, la puissance maximale, la puissance moyenne, la force maximale, la force moyenne et le ratio temps de vol : contraction (RTV:C). Les auteurs mettent en évidence que seules la puissance moyenne, la force maximale et la force moyenne présentent une bonne sensibilité lors du test et sont donc capables de détecter le plus petit changement d'intérêt (« Smallest Worthwhile Change » (SWC)). Aussi, pour faire le lien avec l'un des objectifs de leur étude, qui était d'évaluer le nombre de sauts requis pour évaluer l'apparition de fatigue, les auteurs concluent que l'utilisation de deux CMJ suffit, dans un souci de gain de temps, et que les paramètres liés à la puissance moyenne ou la force (moyenne ou maximale) doivent être prioritairement pris en compte.

Roe et al. (2017a) proposent une nouvelle étude visant à comparer l'utilisation du CMJ ou de sprints sur vélo pour évaluer les variations de fatigue chez des joueurs U20, en lien avec la charge d'entraînement réalisée. Les auteurs mettent en évidence que la puissance moyenne et maximale enregistrée en CMJ est plus sensible à l'augmentation de la charge de travail que chez les paramètres mesurés sur vélo. Ils suggèrent que compte tenu de la fiabilité de la mesure et de la facilité à mettre en œuvre par rapport à des sprints sur vélo, le CMJ pourrait être préféré pour surveiller la fonction neuromusculaire du bas du corps chez les jeunes rugbymen.

2.3.2.1.1. Les modifications de la fonction neuromusculaire (CMJ) chez les séniors

Des modifications de la fonction neuromusculaire du bas du corps ont été rapportées dans les 60 premières heures (h) suivant le match chez des joueurs professionnels séniors de rugby à XV, grâce à l'utilisation d'un test de sauts (CMJ). West et al. (2014) ont observé des diminutions significatives de la puissance maximale 12h (changement moyen \pm intervalles de confiance, -7 ± 6 %) et 36h (-6 ± 4 %) après le match, et des diminutions non significatives 60h (-2 ± 4 %) après le match. La puissance maximale relative et la hauteur du saut (CMJ) ont

montré des changements similaires à chaque temps d'évaluation. De même, Shearer et al. (2015) ont trouvé des diminutions significatives de la puissance développée lors du CMJ à 12h (-8,01 %), 36h (-5,78 %) et des diminutions non significatives à 60h (-2,27 %) après le match chez des rugbymen séniors professionnels.

Nunes et al. (2019) ont observé chez des rugbymen professionnels brésiliens, une diminution de la hauteur de saut (CMJ) immédiatement après le match et jusqu'à 72h après le match. En revanche, les auteurs ayant utilisé des plateformes de force n'ont observé aucune différence de pic de puissance enregistré lors des CMJ tout au long des tests. Par ailleurs, l'évaluation de la montée en force (RFD) met en évidence une diminution des performances immédiatement après le match et jusqu'à 48h après le match.

Bien que provenant d'une pratique cousine, le rugby à XIII, il nous semble pertinent de présenter deux enquêtes qui ont été menées sur les facteurs potentiels qui peuvent contribuer à la diminution de la fonction neuromusculaire après le match. Twist et al. (2012) et McLellan and Lovell (2012) ont examiné la relation entre les réductions de la fonction neuromusculaire après le match et les plaquages codés par les analystes et les impacts dérivés de l'accéléromètre du GPS respectivement chez les joueurs professionnels de rugby à XIII. Twist et al. (2012) ont observé une corrélation significative entre les collisions et les variations du temps de vol du CMJ notamment chez les avants ($r = -0,55$ [-0,85 à 0,01]) dans les 24h suivant le match. De leur côté, McLellan and Lovell (2012) ont rapporté que les zones caractérisées à fort impact (très fort : 8,1-10G, et violent : > 10,1G) dérivées de l'accéléromètre étaient significativement corrélées avec les réductions de la RFD pic et de la puissance maximale ($r > -0,58$) 24h après le match. Ce qui suggère que les collisions peuvent être liées aux fluctuations de performance post-match de la fonction neuromusculaire du bas du corps. D'après la littérature examinée ci-dessus, il est difficile de déterminer le marqueur le plus sensible de la fatigue neuromusculaire en raison de l'hétérogénéité des paramètres étudiés (hauteur de saut, puissance maximale,

puissance maximale relative, force maximale, RFD pic). Pour autant, d'après les résultats Taylor (2012), Twist et al. (2012) ou encore McLellan and Lovell (2012), et renforcés par la revue de littérature proposée par Johnston et al. (2014a), de fortes recommandations sont faites sur l'utilisation de paramètres impliquant une composante de vitesse, comme la puissance (force x vitesse), pour évaluer la fatigue neuromusculaire.

2.3.2.1.2. Les modifications de la fonction neuromusculaire (CMJ) chez les jeunes

Contrairement à leurs homologues séniors, la littérature analysant la fatigue post-match chez les jeunes dans des sports de collision est très peu fournie.

Roe et al. (2016c) ont proposé d'analyser les variations de la fonction neuromusculaire du bas du corps post-match chez des jeunes joueurs U18 d'académies de clubs professionnels. Ils ont mesuré la puissance moyenne lors de CMJ réalisés pré-match, immédiatement après le match (Post-match), 24h, 48h et 72h après le match. Les auteurs relèvent que la puissance moyenne diminue probablement immédiatement après le match ($-5,5 \pm 3,3$ %), très probablement à 24h ($-7,0 \pm 3,9$ %), probablement à 48h ($-5,8 \pm 5,4$ %). Une variation insignifiante est observée à 72h ($-0,8 \pm 3,8$). Ils notent toutefois une forte hétérogénéité dans les réponses individuelles. L'analyse a été complétée en évaluant les réponses par poste (Roe 2017). Les avants et les arrières présentent tous une diminution de la puissance moyenne immédiatement post-match ($-6,0 \pm 5,3$ %, et $-5,4 \pm 4,5$ %, respectivement), à 24h ($-6,9 \pm 4,5$ %, et $-4,1 \pm 5,1$ %, respectivement), et à 48h ($-6,1 \pm 6,1$ %, et $-3,7 \pm 7,4$ %, respectivement). Aucune différence de puissance moyenne entre les groupes de postes n'a été observée pour chaque moment de mesure. En revanche, l'analyse du temps de vol présente des patterns de récupération différents entre les groupes de postes. Les avants présentent une réduction du temps de vol lors du saut possiblement plus grande post-match, probablement plus grande à 24h et possiblement plus grande que les arrières à 48h. Les auteurs avancent l'hypothèse que cette différence dans le

pattern de récupération serait expliquée par une dégradation plus importante de la fonction neuromusculaire par des actions de collisions (une moyenne de 21,1 collisions et 16 mêlées réalisées par les avants ont été relevées par les auteurs, contre 12,8 chez les arrières, différence presque certainement substantielle), que par des courses à haute intensité (pas de différence relevée entre les groupes de poste).

Ramírez-López et al. (2020b) ont évalué l'évolution de la fonction neuromusculaire au cours d'une compétition internationale U18, proposant un enchaînement de trois rencontres. Les auteurs mettent en évidence une diminution des performances de hauteur en CMJ, une dégradation 24h après les rencontres chez les avants (24h post-match 1 : Taille de l'effet (TE) = $-0,31 \pm 0,15$; 24h post-match 2 : TE = $-0,25 \pm 0,17$) et arrières (24h post-match 1 : TE = $-0,40 \pm 0,17$; 24h post-match 2 : TE = $-0,28 \pm 0,17$) par rapport aux valeurs pré-match 1. Les résultats montrent qu'à 48h les données de hauteur de saut semblent revenir à des valeurs comparables à celles enregistrées en pré-match 1 (Ramírez-López et al. 2020b). Ces résultats semblent cohérents avec ceux précédemment publiés sur l'évaluation de la fatigue lors d'une coupe du monde de rugby U20 (Lacome et al. 2018), soit un enchaînement de cinq matchs internationaux. En effet, les auteurs montrent qu'à 36h post-match les données de hauteur au CMJ présentent une petite différence (match 2 et match 4 pour les joueurs ayant le plus joué) voire aucune différence avec les valeurs pré-match 1 (Lacome et al. 2018).

Aucune étude à ce jour n'a évalué les différences d'impact sur la fonction neuromusculaire du bas du corps en fonction des catégories d'âge, tout en prenant en compte la charge externe imposée par les rencontres.

Points à retenir concernant l'évaluation de la fonction neuromusculaire pour l'état de forme :

- L'évaluation du CMJ est un bon témoin de la dégradation de la fonction neuromusculaire post-match.
 - Chez les jeunes, on observe une diminution des performances en CMJ immédiatement post-match, avec un retour à des valeurs de base après 48h de récupération.
 - La littérature met en évidence une plus forte dégradation de la fonction neuromusculaire (temps de vol en CMJ) chez les avants que les arrières, sans doute expliquée par une activité combattue plus importante en match.
-

2.3.2.2. Marqueur de dommages musculaires : la créatine kinase

De nombreux marqueurs faisant état des lésions musculaires ont été étudiés dans la littérature, notamment la créatine kinase (CK), le lactate déshydrogénase, l'aldolase, la myoglobine et la troponine, qui sont toutes des enzymes ou des protéines cellulaires qui passent dans la circulation sanguine à la suite de la rupture des membranes des cellules musculaires (Brancaccio et al. 2010). La principale mesure des dommages musculaires étudiés dans la littérature sur les sports de collision est la concentration de créatine kinase ([CK]) (Takarada 2003, McLellan et al. 2010, Johnston et al. 2015, Roe et al. 2016a, Lacomme et al. 2018). Nous avons souhaité orienter le propos de la thèse sur le marqueur biologique de la CK. La CK est une enzyme contenue dans les cellules musculaires qui est un catalyseur de la production d'adénosine triphosphate (ATP) (Brancaccio et al. 2010). Suite à l'exercice, la [CK] augmente dans la circulation sanguine en raison des modifications de la perméabilité des membranes des cellules musculaires (Baird et al. 2012). Le mécanisme exact qui modifie la perméabilité des membranes fait encore l'objet de débats, mais Baird et al. (2012) émettent l'hypothèse d'une gamme complexe d'évènements impliquant un stress oxydatif accru et des réponses inflammatoires et immunitaires. En outre, le processus inflammatoire qui résulte d'un exercice

endommageant les muscles peut entraîner une augmentation transitoire de la perméabilité de la membrane des cellules musculaires, permettant la fuite de la CK dans la circulation sanguine (Brancaccio et al. 2010, Baird et al. 2012). Or, de fortes concentrations de marqueurs d'inflammation aigüe ont été observées post-match en rugby à XV (Lindsay et al. 2015b).

C'est pourquoi dans le contexte spécifique des athlètes de sports de collisions, comme au rugby à XV, qui effectuent non seulement des actions excentriques liées à la locomotion à différentes vitesses (Jones et al. 2014), mais subissent également de nombreux traumatismes liés aux impacts lors des matchs ou des entraînements (Lindsay et al. 2015a), on observe que la [CK] augmentait davantage après un entraînement avec contact que sans contact (Johnston et al. 2014b). De plus, Takarada (2003) a révélé une relation presque parfaite ($r = 0,92$) entre la [CK] et le nombre de collisions pendant les matchs chez les joueurs de rugby. Par conséquent, elle peut constituer un marqueur utile des lésions musculaires dans ces populations. Huerta-Alardín et al. (2004) rapportent des [CK] normales se situant entre 45 et 260 U/L. Toutefois, il convient d'être prudent lorsque l'on compare les athlètes pratiquant des sports de collision à des valeurs normatives, car cette population présente souvent une [CK] plus élevée, Takarada (2003) rapporte des valeurs supérieures à 2000 U/L.

Roe et al. (2016a) relèvent un coefficient de variation (CV) de la [CK] entre les jours de 26 %, avec une mesure de SWC de 8,6 %, ce qui représente une variation supérieure au seuil acceptable. Malgré tout, les auteurs indiquent que ces fluctuations entre les jours seraient représentatives de hauts niveaux de variations déjà enregistrés (Bagger et al. 2003). Les auteurs mettent également en avant des résultats similaires (CV = 27 %) rapportés par Twist and Highton (2013). Cependant, cette variation de 26 % reste bien éloignée des plus de 200 % de variations enregistrées post 24h (Cunniffe et al. 2009, McLellan et al. 2011a, da Silva et al. 2020). Roe et al. (2016a) concluent à une utilisation justifiée de la [CK] comme évaluation des

dommages musculaires post-match chez des jeunes joueurs de rugby, tout en prenant en considération les variations existantes entre les jours lors de l'interprétation des résultats.

2.3.2.2.1. Les modifications de concentration des marqueurs de dommages musculaires chez les séniors

Takarada (2003) a évalué les variations de [CK] post-match, immédiatement après, 45 min, 90 min, 24h, 48h et 72 h après le match, chez une population de rugbymen amateurs japonais. L'auteur rapporte que les valeurs de [CK] augmentent de façon non significative entre 0 min et 90 min post-match. En revanche, une augmentation significative est observée 24h après le match. Les données à 48h, ont diminué par rapport à 24h, mais ne sont pas significativement différentes de l'état de repos et les données à 72h continuent de diminuer.

À l'image des résultats précédemment décrits (Takarada 2003), Johnston et al. (2013b) mettent en avant une augmentation non significative deux heures après le match de la [CK]. Ils rapportent une augmentation significative de la [CK] post 12h et post. Pour finir les auteurs analysent également qu'avec l'enchaînement d'un second match 48h après le premier, les [CK] post 12h du premier match étaient significativement supérieures à celles mesurées post 12h du second match.

Des [CK] post-match plus importantes ont été observées chez les avants que chez les arrières (Smart et al. 2008). Les auteurs mettent en évidence une forte corrélation entre les variations de [CK] post-match et le nombre de collisions, expliquant des données de [CK] plus importantes chez les avants.

Des résultats contradictoires ont été avancés par Jones et al. (2014), qui ont observés des [CK] 16h après le match plus importantes chez les arrières que chez les avants. Plus de différences entre les groupes de postes 40h post-match. Les auteurs montrent des corrélations entre les

variations de [CK] et la distance parcourue à haute intensité ($>5 \text{ m.s}^{-1}$), la distance sprintée ($>5,6 \text{ m.s}^{-1}$) et le nombre de sprints chez les arrières. Ce qui expliquerait les observations faites sur la [CK], les auteurs avancent que ces paramètres de charge externe pourraient être des indicateurs raisonnables de l'ampleur de variation de la [CK].

2.3.2.2.2. Les modifications de concentration des marqueurs de dommages musculaires chez les jeunes

Peu d'études se sont intéressées à l'évaluation des dommages musculaires sur un public de jeunes joueurs par rapport aux séniors. Malgré tout, nous recensons deux études ayant analysé l'évaluation des variations de [CK] post-match chez des jeunes U18 anglais (Roe et al. 2016c), ainsi qu'une évaluation des fluctuations de [CK] dans l'enchaînement de matchs internationaux U20 (Lacome et al. 2018).

Une fois l'utilisation de la [CK] validée pour l'évaluation de la fatigue, Roe et al. (2016c) se sont intéressés aux changements de [CK] post-match chez de jeunes joueurs ($17,4 \pm 0,8$ ans) d'académies de clubs professionnels. Les résultats révèlent une augmentation presque certaine immédiatement après le match ($+138,5 \pm 33,1 \%$). Un pic de [CK] post 24h ($+326,6 \pm 77,6 \%$), comme déjà observé dans la littérature (Takarada 2003). Une augmentation par rapport aux valeurs pré-match encore presque certainement substantielle post 48h ($+176,4 \pm 62,4 \%$) et très probablement substantielle 72h après le match ($+56,7 \pm 34,5 \%$). Ce qui ne semble pas être en accord avec l'évaluation de la fonction musculaire, puisque les auteurs observent qu'à post 72h, les valeurs moyennes de la puissance au CMJ sont revenues à la normale. Les valeurs de [CK] à 72h relèveraient de résidus dans le sang, plus que de dommages musculaires (Roe et al. 2016c).

Pour finir, Lacombe et al. (2018) ont évalué les fluctuations de [CK] au cours d'une compétition U20 internationale, représentant un enchaînement de cinq matchs. Les auteurs relèvent de possibles à très probables augmentations de [CK] 24h suivant le match. Par ailleurs, les auteurs révèlent qu'avec l'enchaînement des matchs tous les quatre jours jusqu'au troisième match, les [CK] à la veille du quatrième match sont encore possiblement supérieure aux valeurs de repos, malgré une journée de récupération supplémentaire.

Bien que ces quelques résultats commencent à alimenter la connaissance de l'impact des matchs chez les jeunes sur les marqueurs de dommages musculaires, il semble important de continuer à enrichir la connaissance notamment au niveau international, U18 et U20. De plus, avec une organisation de compétition relativement similaire (matchs tous les quatre jours), il serait intéressant d'évaluer si les joueurs récupèrent aussi vite en fonction de leur catégorie d'âge.

Points à retenir concernant l'utilisation de [CK] pour évaluer l'état de forme :

- La [CK] est un témoin de la dégradation musculaire induite par les collisions et les actions de haute et très haute intensité (sprints, accélérations).
- D'importantes augmentations de la [CK] sont observées post-match, +24h, +48h et jusqu'à 72h post-match. Tout en prenant en considération que les valeurs à +72h ne seraient pas à imputer aux dommages musculaires, mais seraient des résidus sanguins.
- Pas de consensus montrant des valeurs de CK post-match plus importantes en fonction du poste.

2.3.2.3. Questionnaire d'état de forme

Des mesures de la perception de la fatigue sont utilisées pour surveiller la récupération des athlètes de haut niveau (Main et al. 2010, Shearer et al. 2015). À la différence des mesures de la fonction neuromusculaire ou des marqueurs biologiques de la fatigue qui supposent l'utilisation d'outils coûteux nécessitant une certaine expertise, la mesure de la fatigue perçue est très simple à mettre en place. Des outils d'autoévaluation ont été proposés comme le Profile

Of Mood States (POMS) (McNair et al. 1971, Morgan et al. 1987). Ce questionnaire basé sur 65 items, notés de 1 à 5 (1 correspondant à « pas du tout » et 5 à « extrêmement »), permet d'évaluer le niveau de colère, de confusion, de dépression, de fatigue, de tension et de vigueur. Bien qu'ayant été validé pour son utilisation dans le sport (Morgan et al. 1987), le POMS présente l'inconvénient majeur d'être un long questionnaire difficilement utilisable au quotidien dans l'entraînement. Ce qui a poussé l'arrivée de nouveaux questionnaires plus simples à mettre en place, car plus courts. Le Brief Assessment of Mood (BAM) (Dean et al. 1990) a alors fait son apparition, évaluant l'humeur au travers des 6 grands piliers mesurés par le POMS (la colère, la confusion, la dépression, la fatigue, la tension et la vigueur). Shearer et al. (2015) avancent que cette mesure rapide du niveau de fatigue obtenue avec le BAM semble utile pour compléter d'autres mesures de la récupération comme le CMJ. Malgré cela, le BAM présente l'inconvénient de ne pas évaluer des paramètres qui semblent importants à la compréhension de l'état de forme du joueur : la qualité du sommeil, le stress perçu ou encore la motivation (Shearer et al. 2017). C'est pourquoi Shearer et al. (2017) ont proposé le BAM+, incluant au BAM quatre nouveaux critères : la confiance, la motivation, les douleurs musculaires et la qualité du sommeil. Les auteurs en ont validé l'utilisation pour évaluer la récupération, tout en recommandant de combiner la méthode BAM+ à d'autres mesures (fonction neuromusculaire par exemple). McLean et al. (2010) a également proposé un questionnaire basé sur les travaux de Hooper and Mackinnon (1995), évaluant la fatigue générale, la qualité du sommeil, les douleurs musculaires, le niveau de stress et l'humeur sur une échelle de 1 à 5 (5 correspondant au meilleur état). On retrouve aussi ce même questionnaire avec une distinction sur les douleurs musculaires du haut et du bas du corps (Roe et al. 2016a, Roe et al. 2016c, Lacombe et al. 2018). Roe et al. (2016a) ont étudié la fiabilité du questionnaire dérivé des travaux de McLean et al. (2010) évaluant la fatigue générale, la qualité du sommeil, les douleurs musculaires (du haut et du bas du corps), le niveau de stress et l'humeur chez des

jeunes joueurs de rugby U18 d'académies de clubs professionnels. Les auteurs observent un coefficient de variation de 7,1% entre deux tests, séparés de 5 jours sans entraînements. Ils relèvent que d'autres études avaient rapporté des CV allant de 12% à 25% dans des périodes d'entraînement ou de compétition chez des adultes (Gastin et al. 2013, Montgomery and Hopkins 2013). Or, Roe et al. (2016a) ont mesuré leurs CV dans une période sans entraînement. Ces 7,1% de variations seraient donc liés à des paramètres tels que la qualité de leur sommeil ou un stress généré par le quotidien des jeunes (Roe et al. 2016a). Comme pour les données de [CK], les auteurs encouragent les praticiens à utiliser le questionnaire d'état de forme tout en prenant bien en compte les variations existant entre les tests, même en période sans entraînement.

2.3.2.3.1. Les modifications de l'état de forme chez les séniors

La perception de la fatigue par le joueur est donc un élément important à prendre en compte. En effet, bien que subjective, la fatigue perçue par le joueur reflète un état transitoire du joueur qui semble être très fluctuant après un match (McLean et al. 2010, West et al. 2014). West et al. (2014) ont montré une augmentation de troubles liés à l'humeur 12h post-match, pour revenir à des valeurs de base à 36h (sans valeur intermédiaire). Une cinétique de récupération un peu plus longue a été observée par Shearer et al. (2015), qui rapportent des valeurs de trouble de l'humeur encore différentes du pré-match à post 36h, et reviennent à des valeurs de base à 60h. Twist et al. (2012) ont étudié les réponses post-match (J+1 et J+2) à leur perception de la fatigue ainsi qu'aux douleurs musculaires (sur une échelle de 1 à 5). Ils observent une augmentation de la fatigue perçue et des douleurs musculaires à J+1 et J+2 chez les avants et les arrières. Les auteurs ont trouvé des corrélations positives entre ces deux paramètres de fatigue perçue avec respectivement le nombre total de contacts, de contacts défensifs et de contacts offensifs chez

les avants (fatigue : $r = 0,69$; $r = 0,71$; $r = 0,53$ et douleurs musculaires : $r = 0,62$; $r = 0,63$; $r = 0,49$, respectivement).

2.3.2.3.2. Les modifications de l'état de forme chez les jeunes

Chez les jeunes joueurs de rugby, seules quelques études se sont intéressées à la perception de la fatigue post-match.

À la différence des études menées chez les séniors (West et al. 2014, Shearer et al. 2015), Roe et al. (2016c) observent les réponses aux questionnaires à 72h post-match sont encore probablement plus faibles comparées aux valeurs pré-match ($-3,6 \pm 3,7$ %). En revanche, à l'instar des séniors, un pic de diminution de l'état de forme est observé presque certainement à post 24h. Les jeunes joueurs auraient besoin d'une fenêtre de récupération un peu plus longue (environ 72h) que les séniors (où 48h suffisent).

Ramírez-López et al. (2020b) ont évalué les réponses au questionnaire d'état de forme de jeunes joueurs U18 tout au long d'une compétition internationale, enchaînant trois matchs espacés tous les quatre jours. Comme Roe et al. (2016c), les auteurs constatent un pic de diminution de l'état de forme des joueurs 24h post-match, avec un retour à des valeurs de base entre 72h et 96h post-match. Les valeurs pré-match 2 et pré-match 3 ne montrent pas d'accumulation de fatigue perçue au cours de la compétition puisqu'elles sont toutes deux revenues à un niveau de base.

Une étude similaire avait été menée à l'occasion d'une coupe du monde de rugby U20 (Lacome et al. 2018). Les auteurs n'ont ici pas évalué la fatigue perçue à post 24h, mais seulement 48h après le match. Ils constatent qu'à 48h post-match les réponses au questionnaire des joueurs U20 sont revenues à des valeurs de bases, sauf après le match 4 pour les joueurs ayant le plus joué avec une petite diminution possible ($-5,1 \pm 5,8$ %). Les auteurs relèvent une fatigue perçue

de match à match grandissante. Des résultats en accord avec ceux de Twist et al. (2017) lors d'un enchaînement rapproché de matchs.

Bien que les études de Ramírez-López et al. (2020b) et Lacome et al. (2018) soient relativement récentes, elles restent les deux seules à avoir traité des fluctuations de la fatigue perçue à l'issue de matchs internationaux U18 et U20 respectivement. Il serait donc intéressant d'étoffer la littérature avec de nouvelles données. De plus, aucune étude à ce jour n'a proposé de comparer la cinétique de récupération entre les U18 et les U20 après des matchs de rugby internationaux.

Points à retenir concernant l'utilisation du questionnaire pour évaluer l'état de forme :

- L'utilisation du questionnaire évaluant la fatigue générale, la qualité du sommeil, les douleurs musculaires, le niveau de stress et l'humeur est validée pour analyser l'état de forme en rugby.
 - Chez les jeunes, des diminutions des réponses aux questionnaires post-match ont été observées jusqu'à 72h post-match, avec un retour à des valeurs de base entre +72h et +96h.
 - Lors d'un enchaînement de matchs chez les jeunes (espacés de quatre jours), on constate une accumulation de fatigue à partir du quatrième match.
-

3. PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE

La revue de littérature a présenté un large spectre de la prise en charge du développement du joueur de rugby, à commencer par la prise en considération des qualités physiques nécessaires, observées chez des joueurs de différents âges, niveaux de pratique et à différents postes. Ce qui met en évidence des profils anthropométriques et physiques de joueurs très hétérogènes. Nous avons ensuite présenté comment ces joueurs, avec les qualités anthropométriques et physiques qui sont propres à leur âge ou leur niveau et leur poste, peuvent s'exprimer en match, en décrivant leur déplacement ainsi que l'activité de combat spécifique au rugby. L'analyse du match a été présentée au moyen de différents outils que sont l'analyse globale du match, l'analyse des séquences de temps de jeu effectif et l'analyse des séquences maximales d'activité. On a pu observer des niveaux d'intensité de déplacement ou de fréquence de contact bien différents d'une méthode à l'autre. Ce qui met en évidence de larges fluctuations d'activité au cours du match. Pour finir cette revue de littérature, nous avons constaté que l'exigence physique du match avait des conséquences sur plusieurs facteurs de la fatigue du joueur. A commencer par l'augmentation de la perception de fatigue qu'à le joueur, mais aussi une dégradation de la fonction neuromusculaire, l'ensemble traduisant une perturbation générale de l'homéostasie. Tous ces paramètres de la fatigue présentent des dynamiques de retour à des valeurs basales différentes les uns des autres, mais l'entraîneur ou le préparateur physique doivent trouver le meilleur compromis entre temps de récupération et reprise d'entraînement sans risquer d'exposer le joueur à la blessure.

Cette revue de littérature a surtout mis en évidence, sur tous les champs de recherche étudiés, que le niveau international jeune est encore très peu investigué et qu'un réel manque de connaissances est constaté.

C'est pourquoi, l'objectif principal de ce travail de thèse est de décrire l'environnement de développement du jeune joueur de rugby français, de son entrée en structure d'élite (les académies fédérales) en moins de 16 ans jusqu'aux portes du professionnalisme en moins de 20 ans. En plus d'alimenter le corpus scientifique lié aux jeunes rugbymen, ce travail de thèse répondra à une réflexion et des objectifs fédéraux qui alimenteront les méthodologies d'identification des jeunes joueurs et d'approche de l'entraînement (contenu et planification). Pour répondre à ces interrogations, nous chercherons tout d'abord (Étude 1) à décrire les caractéristiques anthropométriques et physiques des jeunes joueurs au cours de leur parcours de formation. Nous chercherons à identifier si la batterie de test fédéral mise en place permet une identification des joueurs internationaux. Ensuite (Étude 2), nous chercherons à décrire les exigences physiques des matchs internationaux jeunes. L'objectif étant de caractériser finement le déplacement et l'activité combattue des joueurs U18 et U20 en fonction des postes avants et arrières. Puis de comparer les exigences observées entre les catégories d'âge. Pour finir (Étude 3), nous analyserons l'impact de l'exigence physique des matchs internationaux sur les marqueurs de l'état de forme des jeunes joueurs dans les jours qui suivent le match, au travers de marqueurs de fatigue perçue, de fatigue neuromusculaire et de marqueurs biologiques de dégradation musculaire. Nous comparerons également les niveaux de fatigue post-match entre les catégories d'âge (U18 et U20).

Au-delà des objectifs scientifiques auxquels nous avons essayé de répondre tout au long de ce travail de thèse, nous ne pouvons pas oublier que ce travail s'est effectué dans le cadre d'une convention industrielle de formation par la recherche (CIFRE), et que les expérimentations et analyses proposées devaient aussi répondre à des objectifs fédéraux. En effet, pour une institution comme la FFR, les résultats apportés par les études mises en place permettront la création de repères précis dans l'identification des profils physiques à tout âge du parcours de développement du jeune joueur de rugby. Mais aussi créer des critères objectifs d'évaluation de la performance physique en match sur la base de l'analyse des rencontres internationales

ÉTUDE 1 :

CARACTÉRISTIQUES ANTHROPOMÉTRIQUES ET PHYSIQUES DES JEUNES JOUEURS DE RUGBY À XV U16, U18 ET U20 FRANÇAIS.

Peeters, A., Leduc, C., Piscione, J., Lacombe, M., Carling, C., Babault, N. (2022). Anthropometric and physical characteristics in U16, U18 and U20 elite French youth Rugby Union players. *Journal of Strength & Conditioning Research. Soumis.*

4.1. INTRODUCTION

Le rugby à XV requiert une multitude de capacités physiques afin de répondre à la nature intermittente et combative du sport (Duthie et al. 2003). En tant que tel, il est important pour les praticiens d'évaluer les qualités physiques des joueurs pour s'assurer qu'ils soient capables de faire face aux exigences des matchs. Il est également important d'évaluer l'efficacité des programmes d'entraînement et, chez les jeunes, de renforcer les programmes d'identification et de développement des talents. Pour déterminer ces qualités, des batteries de tests physiques holistiques sont systématiquement utilisées par les clubs et les instances dirigeantes (Owen et al. 2022). Malgré l'absence de consensus concernant les protocoles et technologies spécifiques utilisés, les résultats des tests montrent généralement que la force, la vitesse, la puissance et la capacité aérobie sont des déterminants physiques clés pour performer au niveau de l'élite (Owen et al. 2020, Till et al. 2020). Dans le rugby à XV international sénior, ces qualités physiques sont notamment corrélées à des indicateurs clés de performance en match tels que la fréquence et l'efficacité d'actions telles que les plaquages, les collisions et les rucks (Cunningham et al. 2018b).

Des différences dans les qualités physiques des joueurs de rugby à XV ont été observées entre les catégories d'âge et les niveaux de jeu. Peeters et al. (2022) ont montré que lors de matchs de niveau international, les joueurs U18 couvraient une plus grande distance totale, et ce, à des seuils de vitesse différents de ceux de leurs pairs U20. De même, il a été démontré que l'activité de course des joueurs U18 d'académie de clubs professionnels était plus importante que celle de leurs pairs U18 à un niveau scolaire (Read et al. 2018a). Ces résultats suggèrent que les qualités physiques qui sous-tendent la performance en match sont plus développées chez les jeunes joueurs du niveau de l'élite. En effet, Jones et al. (2018) ont rapporté que les joueurs d'une académie de club professionnel présentaient des valeurs supérieures de taille, de masse corporelle, de force, de performance au sprint sur 20 et 40 m et de capacité aérobie, par rapport

aux joueurs d'un niveau scolaire. À notre connaissance, cependant, aucune étude n'a confirmé si des différences similaires dans les caractéristiques anthropométriques et physiques existent également à des niveaux de jeu plus élevés et notamment chez les joueurs nationaux par rapport aux joueurs internationaux. Les qualités physiques inhérentes aux deux niveaux pourraient permettre aux instances dirigeantes d'évaluer et éventuellement d'optimiser leurs critères de sélection et de développement des talents.

De nettes différences dans les capacités physiques ont également été mises en évidence entre les catégories d'âge et les postes occupés. Les recherches de Darrall-Jones et al. (2015) ont montré que les joueurs U18 et U21 étaient plus grands, plus lourds et plus forts que leurs homologues U16. En revanche, aucune différence significative n'a été observée dans le temps au sprint (sur des distances de 5 m à 40 m) ou la capacité aérobie entre ces catégories d'âge. Concernant l'effet du poste, il a été démontré que les avants étaient significativement plus grands, plus lourds et plus forts que les arrières (Darrall-Jones et al. 2016b). En revanche, les qualités de vitesse seraient plus développées chez les arrières que chez les avants (Lombard et al. 2015, Darrall-Jones et al. 2016b). À notre connaissance, cependant, aucune preuve n'est disponible sur les performances physiques liées à l'âge en fonction du poste et du niveau de jeu.

Une limite générale du corpus actuel de recherches sur les qualités anthropométriques et physiques des jeunes rugbymen d'élite est que les études sur les joueurs de niveau international sont rares. Alors que le niveau international U20 a reçu de l'attention (Barr et al. 2014, Lombard et al. 2015), à notre connaissance, aucune information n'est disponible sur les joueurs internationaux U18. De même, une grande partie des études existantes n'ont examiné que les populations de l'hémisphère sud (Lombard et al. 2015) ou les joueurs d'académie de clubs professionnels anglais (Darrall-Jones et al. 2015, Darrall-Jones et al. 2016b, Jones et al. 2018). En tant que telles, des recherches supplémentaires sur les qualités anthropométriques et physiques des jeunes joueurs appartenant à d'autres nations de rugby sont sans doute justifiées.

Les objectifs de cette étude chez les jeunes joueurs élités masculins de rugby à XV français étaient de 1) décrire les qualités anthropométriques et physiques des joueurs internationaux et non-internationaux de U16 à U20 et 2) identifier les différences potentielles de ces qualités entre les catégories d'âge et le statut (international ou non-international). Les caractéristiques spécifiques aux postes (avants et arrières) ont également été étudiées pour ces catégories d'âge et ces statuts.

4.2. MÉTHODE

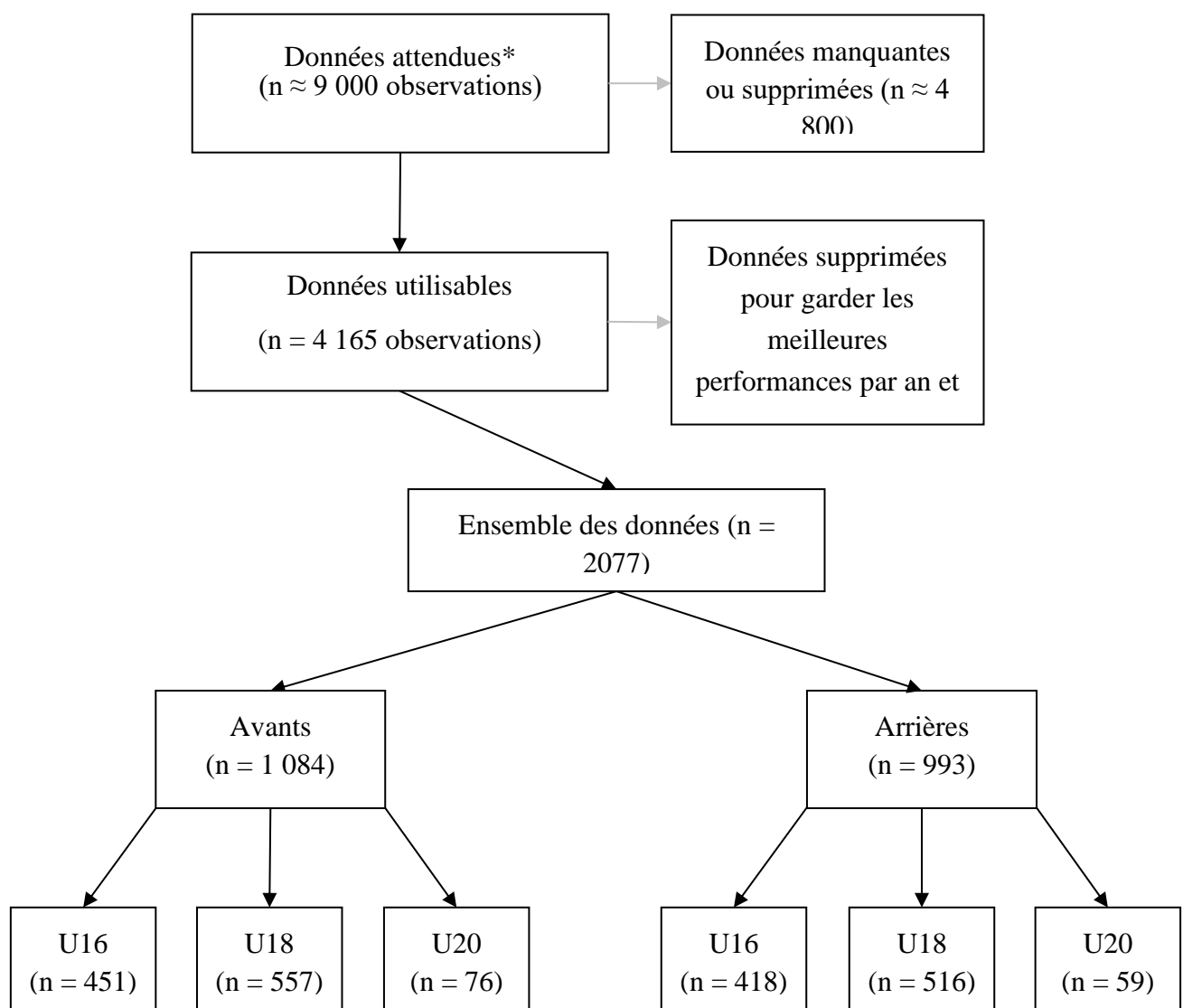
4.2.1. Approche expérimentale du problème

De la saison 2010 à 2020, 1423 joueurs des catégories U16, U18 et U20 appartenant aux académies pôles espoirs de la Fédération Française de Rugby ont participé à la batterie nationale de tests physiques qui fait partie du PPF. Tous les joueurs ont été évalués sur une série de mesures anthropométriques (-masse corporelle et taille), des tests en salle (développé couché, squat isométrique, saut vertical) et des tests sur le terrain (capacité aérobie : VMA ; vitesse : sprint de 10 et 50 mètres). Une analyse de variance par modèle mixte à deux voies (ANOVA) a été utilisée pour étudier les caractéristiques physiques entre les catégories d'âge et le statut (INT ou NI). Deux modèles distincts ont été utilisés pour les avants et les arrières. Le statut INT a été appliqué aux joueurs ayant joué au moins un match officiel pour l'équipe nationale française U20 ou l'équipe nationale française sénior, tandis que les autres joueurs ont été classés comme NI.

4.2.2. Participants

Le processus d'inclusion est illustré dans la Figure 4.1. Au total, 1423 joueurs masculins de rugby à XV d'élite ont été inclus entre les saisons 2010-2011 et 2019-2020 consécutivement.

Les joueurs s'entraînaient dans les académies pôles espoirs de la FFR environ 7 heures par semaine sur le terrain et 5 heures en salle (séances de préparation physique) respectivement. Toutes les données ont été collectées dans le cadre du parcours PPF de la FFR. Néanmoins, les participants ont donné leur consentement éclairé avant de commencer l'étude. Les parents ou un tuteur ont fourni un consentement écrit pour tous les joueurs âgés de moins de 18 ans. L'étude a été approuvée par la commission scientifique et de recherche de la FFR et les recommandations de la Déclaration d'Helsinki ont été respectées.



* Ce nombre a été extrapolé sur la base du nombre de joueurs dans les académies pôles espoirs testés chaque année.

Figure 4.1 : Diagramme d'inclusion des participants.

4.2.3. Procédures

Les données ont été recueillies pendant dix ans dans les dix académies pôles espoirs de rugby de la FFR. Trois périodes de sessions de tests ont été identifiées pour chaque année : avant-saison (c'est-à-dire de septembre à décembre), pendant la saison (c'est-à-dire de février à avril) et en fin de saison (c'est-à-dire de juin à juillet). Tous les joueurs ont été évalués pour une série de caractéristiques anthropométriques (masse corporelle et taille) et physiques (force : développé couché, squat isométrique ; puissance : saut vertical ; capacité aérobie : vitesse maximale aérobie (VMA) ; vitesse : sprint de 10 et 50 mètres). Afin de réduire l'influence éventuelle de la fatigue, les séances de test ont été réparties sur deux jours (Figure 4.2). Le premier jour, les caractéristiques anthropométriques, la puissance et la vitesse ont été testées le matin, tandis que les évaluations de la force ont été effectuées l'après-midi. L'évaluation aérobie a été réalisée le matin du deuxième jour. Les tests ont été entièrement expliqués et démontrés avant chaque évaluation par l'entraîneur de force et de conditionnement en charge de la batterie de tests. Toutes les procédures sont décrites plus en détail dans la section méthodologie. Seules les meilleures performances du joueur au cours de la saison ont été retenues pour chaque test physique.

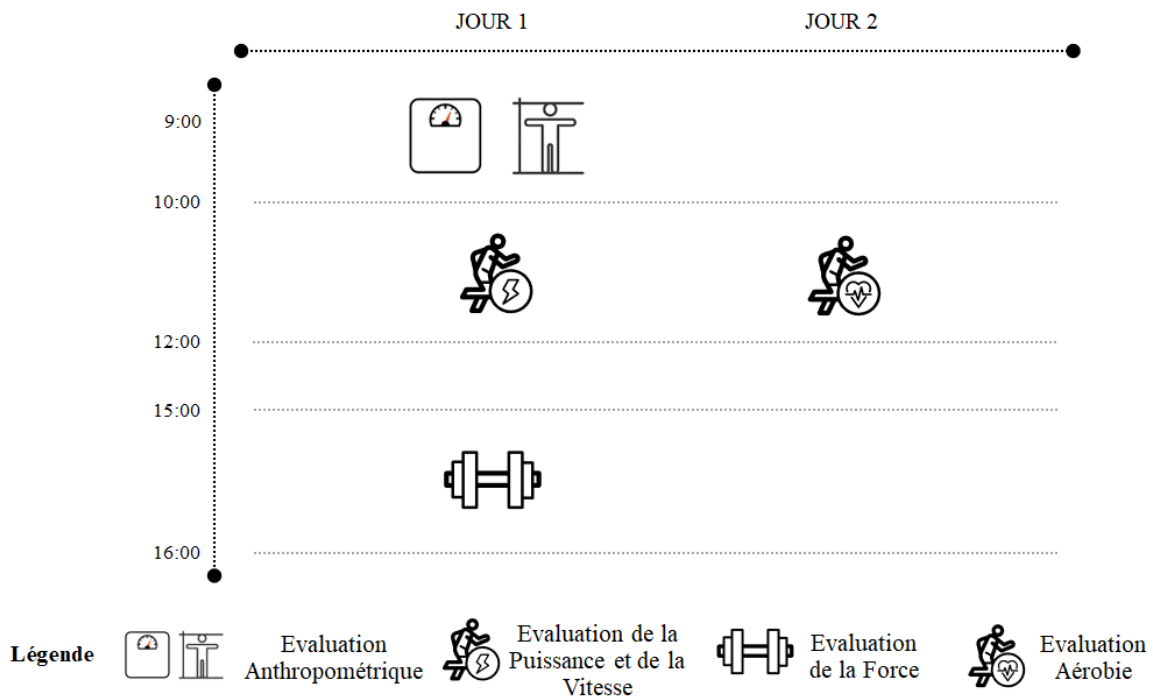


Figure 4.2 : Schéma représentant le design de l'étude.

Caractéristiques anthropométriques

Taille et masses. Chaque joueur a été pesé pieds nus et ne portait que ses sous-vêtements. Des recherches antérieures ont signalé une erreur de mesure typique exprimée en % de coefficient de variation (CV) de 0,6 % (Lombard et al. 2015). La taille debout a été enregistrée avec le joueur pieds nus, et les bras positionnés sur les côtés. Ses talons, ses fesses, le haut de son dos et sa tête étaient en contact avec un mur. La mesure a été enregistrée comme la hauteur entre le sol et le sommet de la tête avec un mètre ruban. Des recherches antérieures ont rapporté une erreur de mesure typique (%) de 0,2 % (Lombard et al. 2015).

Tests en salle

Force du haut du corps. Le développé couché en 3 répétitions maximales (RM) a été utilisé pour évaluer la force du haut du corps (Darrall-Jones et al. 2015, Weakley et al. 2019a). L'évaluation a commencé par un protocole d'échauffement standardisé, comprenant une augmentation progressive de la charge, à des charges sous-maximales et proches du 3RM. Les joueurs avaient 5 tentatives pour atteindre leur performance 3RM, avec 3 à 5 minutes de récupération entre les séries. Le préparateur physique contrôlait l'exécution : la tête, le haut du dos et les fesses étaient en contact avec le banc, et le pied en contact avec le sol ou surélevé avec une cale.

Force du bas du corps. La force du bas du corps des joueurs a été évaluée à l'aide d'une plateforme de force portable (Kistler 9286B, Kistler, Winterthur, Suisse) pendant un squat isométrique. Les données de la plateforme de force ont été échantillonnées à 1000 Hz en utilisant la version 5.2 de Bioware (Kistler, Winterthur, Suisse). L'angulation du genou était fixée à 90 degrés et contrôlée par un goniomètre manuel. Après un échauffement standardisé, les joueurs avaient 2 essais (3 à 5 minutes de récupération entre les séries), les meilleures valeurs étant conservées pour l'analyse. La force isométrique maximale en kg (sans la masse corporelle mesurée au début) a été analysée. Des recherches antérieures ont rapporté une bonne fiabilité pour le système Kistler 9286B avec un CV < 3 % et un coefficient de corrélation intraclass (CCI) > 0,95 pour l'évaluation de la force produite (Lu et al. 2019).

Puissance du bas du corps. Le saut vertical, « countermovement jump » (CMJ) a été utilisé pour évaluer la puissance du bas du corps. La hauteur de saut en centimètres (cm) a été mesurée à l'aide du système de cellules photoélectriques Optojump (Microgate, Bolzano, Italie). Après un échauffement standardisé, les participants ont effectué une série de 4 répétitions de CMJ,

avec 3 à 5 secondes de récupération entre les sauts. Il leur était demandé de sauter le plus haut possible en gardant le dos droit et en respectant les repères au sol afin d'éviter tout mouvement vers l'avant ou l'arrière. La valeur moyenne des 3 meilleures hauteurs de saut a été utilisée (Taylor et al. 2010). Les tests du système Optojump ont démontré une excellente fiabilité, avec un CCI = 0,99, un faible CV (2,2%) et une faible erreur typique ($\pm 2,43$ cm) pour l'évaluation de la hauteur du CMJ (Glatthorn et al. 2011).

Tests sur le terrain

Vitesse. Les temps au sprint ont été évalués lors de deux sprints de 10 m et de deux sprints de 50 m à l'aide de cellules photoélectroniques (Smart Speed, Fusion Sport, Australie) avec une précision de 0,01 seconde. L'évaluation de la vitesse a commencé par un protocole d'échauffement standardisé. Les joueurs ont commencé leur sprint en position debout, les pieds placés à 0,5 m derrière la première porte de chronométrage (Haugen and Buchheit 2016). Les essais aux sprints de 10 m étaient séparés par un temps de récupération de 1 min, et de 3 min de récupération pour les sprints de 50 m. Le meilleur des deux temps a été sélectionné pour l'analyse. Des recherches antérieures ont rapporté des CCI et des CV pour les temps au sprint de 10 m et 40 m de CCI $r = 0,94$ et CV = 1,4 %, et CCI $r = 0,96$ et CV = 1,2 %, respectivement (Darrall-Jones et al. 2015).

Capacité aérobie. Le test de l'universitaire Bordeaux 2 (TUB 2) a été réalisé pour déterminer la vitesse maximale aérobie (VMA) (Cazorla et al. 2004). Il s'agit d'un test intermittent incrémental de course adapté du test de Léger et Boucher (Leger and Boucher 1980), composé de séries de 3 min entrecoupées de 1 min de repos passif. La vitesse est augmentée de 2 km.h⁻¹ de 8 à 12 km.h⁻¹ puis de 1 km.h⁻¹ jusqu'à épuisement volontaire. Le test a été effectué sur une piste extérieure en tartan. Les joueurs étaient tous parfaitement familiarisés avec le test. La

VMA correspondait à la vitesse atteinte par le participant lors des 3 dernières minutes du test complétées.

4.2.4. Analyse statistique

Les joueurs ont été classés par poste (avants et arrières), par catégorie d'âge (U16, U18 et U20) et par statut (non-international ou international). Pour chaque catégorie d'âge, le statut international a été appliqué aux joueurs ayant joué au moins un match officiel pour l'équipe nationale française U20 ou l'équipe nationale française sénior. Cette désignation était arbitraire et a été choisie, car nous avons estimé que ces deux catégories représentaient le mieux le rugby français au niveau international. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel JASP (Version 0.14, JASP Team, 2020, Université d'Amsterdam, Amsterdam, Pays-Bas). Le test de normalité de Kolmogorov-Smirnov a été réalisé pour vérifier la distribution de chaque variable incluse dans l'analyse. Une analyse de variance par modèle mixte à deux voies (ANOVA) a été utilisée pour étudier les différences de caractéristiques physiques entre les catégories d'âge et le statut. Deux modèles distincts ont été utilisés pour les avants et les arrières. Lorsqu'une différence significative ($p < 0,05$) a été observée, des analyses post-hoc de Bonferroni ont été utilisées pour détecter les différences par paire. L'éta carré partiel (η^2) a été calculé pour chaque comparaison significative par paire afin d'obtenir l'ampleur de la différence. Les valeurs de 0,01, 0,06 et supérieures à 0,14 ont été considérées comme représentant des différences faibles, moyennes et importantes, respectivement (Cohen 2013).

4.3. RÉSULTATS

Les résultats de l'ANOVA sont présentés dans le Tableau 4.1 pour les deux postes et les Tableaux 4.2 et 4.3 présentent les caractéristiques anthropométriques et physiques des joueurs

avants et arrières respectivement, ainsi que les résultats des tests post-hoc. Les représentations graphiques des caractéristiques anthropométriques et physiques des joueurs U16, U18 et U20 en fonction de leur statut ont été présentées dans les Figures 4.3, 4.4 et 4.5.

Caractéristiques anthropométriques

L'analyse des caractéristiques anthropométriques des joueurs avants a révélé un effet significatif de la catégorie d'âge et du statut sur la taille ($p < 0,05$ et $p < 0,001$, respectivement) et la masse corporelle ($p < 0,001$ et $p < 0,01$, respectivement). Des différences significatives ont été rapportées entre les avants NI et INT pour la taille ($+2,9 \pm 1,6$ cm, $p < 0,001$) et la masse corporelle ($+3,7 \pm 2,5$ kg, $p < 0,01$). Des différences significatives ont été rapportées entre les avants U16 et U18, et U20 pour la masse corporelle ($-7,5 \pm 2,6$ kg, $p < 0,001$, $-10,2 \pm 4,3$ kg, $p < 0,001$, respectivement).

L'analyse des caractéristiques anthropométriques des joueurs arrières a révélé un effet significatif de la catégorie d'âge pour la taille ($p < 0,001$) et la masse corporelle ($p < 0,001$). Des différences significatives ont été observées entre les arrières U16 et U18, et U20 pour la taille ($-2,3 \pm 1,6$ cm, $p < 0,01$, et $-3,9 \pm 2,6$ cm, $p < 0,01$, respectivement) et la masse corporelle ($-6,8 \pm 1,9$ kg, $p < 0,001$, et $-13,0 \pm 3,0$ kg, $p < 0,001$, respectivement). Une différence significative a également été rapportée entre les arrières U18 et U20 pour la masse corporelle ($-6,1 \pm 3,0$ kg, $p < 0,001$).

Tableau 4.1 : Résultats du modèle mixte ANOVA pour chaque poste.

		Avants			Arrières		
		F	p	p η^2	F	p	p η^2
Taille (m)	Catégorie d'âge	3,738	0,024 *	0,008	8,475	< ,001 ***	0,019
	Statut	12,76	< ,001 ***	0,013	1,117	0,291	0,001
	Catégorie d'âge * Statut	0,72	0,487	0,002	0,513	0,599	0,001
Masse corporelle (kg)	Catégorie d'âge	27,393	< ,001 ***	0,05	59,726	< ,001 ***	0,112
	Statut	8,362	0,004 **	0,008	1,941	0,164	0,002
	Catégorie d'âge * Statut	0,922	0,398	0,002	2,227	0,108	0,005

*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$.

Tableau 4.1 : Résultats du modèle mixte ANOVA pour chaque poste (suite).

		Avants			Arrières		
		F	p	p η^2	F	p	p η^2
DC (kg)	Catégorie d'âge	176,86	< ,001 ***	0,282	204,694	< ,001 ***	0,327
	Statut	9,218	0,002 **	0,01	19,735	< ,001 ***	0,023
	Catégorie d'âge * Statut	3,643	0,027 *	0,008	3,286	0,038 *	0,008
Squat iso. (N)	Catégorie d'âge	67,305	< ,001 ***	0,17	55,296	< ,001 ***	0,157
	Statut	17,317	< ,001 ***	0,026	17,643	< ,001 ***	0,029
	Catégorie d'âge * Statut	2,787	0,062	0,008	2,279	0,103	0,008
CMJ (cm)	Catégorie d'âge	41,749	< ,001 ***	0,092	27,062	< ,001 ***	0,068
	Statut	6,271	0,012 *	0,008	10,828	0,001 **	0,014
	Catégorie d'âge * Statut	1,426	0,241	0,003	0,739	0,478	0,002

DC : développé couché ; CMJ : countermovement jump ; Squat iso. : squat isométrique.

*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$.

Tableau 4.1 : Résultats du modèle mixte ANOVA pour chaque poste (suite).

		Avants			Arrières		
		F	p	p η^2	F	p	p η^2
Sprint 10 m (s)	Catégorie d'âge	12,171	< ,001 ***	0,025	5,577	0,004 **	0,013
	Statut	8,081	0,005 **	0,008	22,344	< ,001 ***	0,025
	Catégorie d'âge * Statut	0,592	0,553	0,001	0,174	0,841	0,000
Sprint 50 m (s)	Catégorie d'âge	18,536	< ,001 ***	0,044	15,391	< ,001 ***	0,035
	Statut	3,29	0,07	0,004	16,683	< ,001 ***	0,019
	Catégorie d'âge * Statut	1,306	0,271	0,003	0,38	0,684	0,001
VMA (km.h⁻¹)	Catégorie d'âge	8,945	< ,001 ***	0,026	3,851	0,022 *	0,012
	Statut	0,587	0,444	0,001	9,639	0,002 **	0,015
	Catégorie d'âge * Statut	0,21	0,811	0,001	2,711	0,067	0,009

VMA : vitesse maximale aérobie.

*: p < 0,05 ; **: p < 0,01 ; ***: p < 0,001.

Tableau 4.2 : Caractéristiques anthropométriques et physiques des Avants internationaux et non internationaux par catégorie d'âge.

Avants	U16		U18		U20		Post-Hoc
	NI	I	NI	I	NI	I	
Observations (n)	403	48	455	102	27	49	
Taille (cm)	184,2 ± 6,6	187,3 ± 7,2	186,4 ± 6,9	188,2 ± 6,7	186,5 ± 9,3	190,1 ± 7,4	I > NI(c)
Masse Corporelle (kg)	92,9 ± 12,5	94,8 ± 10,3	98,9 ± 11,9	103,8 ± 9,3	101,9 ± 9,6	106,1 ± 10,7	U16 < U18(c), U20(c) ; I > NI(b)
DC (kg)	78,3 ± 13	79,1 ± 13,3	100,2 ± 16,5	110 ± 16,7	118,2 ± 19,9	124,4 ± 18,6	U16 < U18(c), U20(c) ; U18 < U20(c) ; I > NI(b) ; &
Squat Isométrique (kg)	140,1 ± 28,5	146,7 ± 29,7	164,6 ± 33,5	188,4 ± 38,6	191,8 ± 38,3	211,4 ± 38,5	U16 < U18(c), U20(c) ; U18 < U20(c) ; I > NI(c)
CMJ (cm)	31,2 ± 5,4	31,4 ± 4,3	33,9 ± 5,1	35,7 ± 3,9	37 ± 5,2	39,3 ± 5,4	U16 < U18(c), U20(c) ; U18 < U20(c) ; I > NI(a)

NI : non international ; I : international ; DC : développé couché ; CMJ : countermovement jump ; (a) : p < 0.05 ; (b) : p < 0.01 ; (c) : p < 0.001.

& : U16 INT < U18 INT(c), U18NI(c), U20 INT(c), U20 NI(c) ; U18 INT < U20 INT(c) ; U18 INT > U16 NI(c), U18 NI(c) ; U20 INT > U16 NI(c),

U18 NI(c) ; U16 NI < U18 NI(c), U20 NI(c) ; U18 NI < U20 NI(c).

Tableau 4.2 : Caractéristiques anthropométriques et physiques des Avants internationaux et non internationaux par catégorie d'âge (suite).

Avants	U16		U18		U20		Post-Hoc
	NI	I	NI	I	NI	I	
Sprint 10 m (s)	1,82 ± 0,1	1,79 ± 0,09	1,8 ± 0,09	1,76 ± 0,07	1,75 ± 0,08	1,73 ± 0,07	U16 > U18(b), U20(c) ; U18 > U20(b); I < NI(b)
Sprint 50 m (s)	7,01 ± 0,41	6,99 ± 0,36	6,87 ± 0,37	6,71 ± 0,28	6,71 ± 0,36	6,64 ± 0,3	U16 > U18(c), U20(c)
VMA (km.h⁻¹)	15,2 ± 1,4	15,1 ± 1,3	15,8 ± 1,3	15,7 ± 1,3	15,9 ± 0,9	15,6 ± 1,3	U16 < U18(c)

NI : non international ; I : international ; VMA : vitesse maximale aérobie ; (a) : p < 0.05 ; (b) : p < 0.01 ; (c) : p < 0.001.

Tableau 4.3 : Caractéristiques anthropométriques et physiques des Arrières internationaux et non internationaux par catégorie d'âge.

Arrières	U16		U18		U20		Post-Hoc
	NI	I	NI	I	NI	I	
Observations (n)	377	41	438	78	32	27	
Taille (cm)	176,6 ± 6,3	176,9 ± 6,4	178,3 ± 6,4	179,9 ± 6	180,4 ± 6,5	181 ± 5,5	U16 < U18(b), U20(b)
Masse Corporelle (kg)	72,3 ± 7,6	73,1 ± 7,9	77,8 ± 8,2	81,4 ± 8,4	85,9 ± 7,1	85,5 ± 6,7	U16 < U18(c), U20(c) ; U18 < U20(c)
DC (kg)	72,4 ± 10,8	75,6 ± 10,5	91 ± 12,9	101 ± 12,9	108,4 ± 11,5	116,7 ± 11,7	U16 < U18(c), U20(c) ; U18 < U20(c) ; I > NI(c) ; &
Squat Isométrique (kg)	134,5 ± 25,5	140,2 ± 27,8	157 ± 29,7	173,1 ± 27,4	173,6 ± 22,6	200,2 ± 30,5	U16 < U18(c), U20(c) ; U18 < U20(c) ; I > NI(c)
CMJ (cm)	36,9 ± 4,5	38 ± 4,3	39,4 ± 4,9	41,7 ± 4,4	41,4 ± 4,4	43,5 ± 5,6	U16 < U18(c), U20(c) ; U18 < U20(a) ; I > NI(b)

NI : non international ; I : international ; DC : développé couché ; CMJ : countermovement jump ; (a) : p < 0.05 ; (b) : p < 0.01 ; (c) : p < 0.001.

& : U16 INT < U18 INT(c), U18NI(c), U20 INT(c), U20 NI(c) ; U18 INT < U20 INT(c) ; U18 INT > U16 NI(c), U18 NI(c) ; U20 INT > U16 NI(c), U18 NI(c) ; U16 NI < U18 NI(c), U20 NI(c) ; U18 NI < U20 NI(c).

Tableau 4.3 : Caractéristiques anthropométriques et physiques des Arrières internationaux et non internationaux par catégorie d'âge (suite).

Arrières	U16		U18		U20		Post-Hoc
	NI	I	NI	I	NI	I	
Sprint 10 m (s)	1,73 ± 0,08	1,69 ± 0,07	1,71 ± 0,07	1,67 ± 0,07	1,7 ± 0,07	1,65 ± 0,06	U16 > U18(a), U20(a) ; I < NI(c)
Sprint 50 m (s)	6,53 ± 0,27	6,42 ± 0,21	6,42 ± 0,25	6,26 ± 0,19	6,38 ± 0,23	6,23 ± 0,16	U16 > U18(c), U20(c) ; I < NI(c)
VMA (km.h⁻¹)	16,7 ± 1	16,9 ± 0,9	17 ± 1,1	17,1 ± 1	15,7 ± 0,6	17,2 ± 0,8	I > NI(b)

NI : non international ; I : international ; VMA : vitesse maximale aérobie ; (a) : p < 0.05 ; (b) : p < 0.01 ; (c) : p < 0.001.

Tests en salle

L'analyse des qualités de force et de puissance a révélé un effet significatif de la catégorie d'âge et du statut, pour les deux postes ($p < 0,05$ - $p < 0,001$) pour le test de développé couché, le squat isométrique et le CMJ. Pour les deux postes, des différences significatives ont été observées entre les joueurs INT et NI pour le développé couché (avants : $+5,6 \pm 3,6$ kg, $p < 0,01$, arrières : $+7,2 \pm 3,2$ kg, $p < 0,001$), le squat isométrique ($+16,6 \pm 7,8$ kg, $p < 0,001$, et $+16,1 \pm 7,5$ kg, $p < 0,001$, respectivement) et la hauteur au CMJ ($1,4 \pm 1,1$ cm, $p < 0,05$, et $1,8 \pm 1,1$ cm, $p < 0,01$, respectivement).

Des différences significatives ont été rapportées entre les avants U16 et U18, et entre les avants U18 et U20, pour la force du haut du corps (U16 vs U18 : $-26,4 \pm 3,9$ kg, $p < 0,001$, U16 vs U20 : $-42,6 \pm 6,1$ kg, $p < 0,001$, et U18 vs U20 : $-16,2 \pm 5,6$ kg, $p < 0,001$), la force du bas du corps ($-33,1 \pm 8,6$ kg, $p < 0,001$, $-58,2 \pm 13,2$ kg, $p < 0,001$, et $-25,1 \pm 12,3$ kg, $p < 0,001$, respectivement) et la puissance du bas du corps ($-3,5 \pm 1,2$ cm, $p < 0,001$, $-6,9 \pm 1,9$ cm, $p < 0,001$, et $-3,3 \pm 1,7$ cm, $p < 0,001$, respectivement).

Des différences significatives ont été observées entre les arrières U16 et U18, et U20 et entre les arrières U18 et U20, pour la force du haut du corps (U16 vs U18 : $-22,0 \pm 3,1$ kg, $p < 0,001$, U16 vs U20 : $-38,5 \pm 5,4$ kg, $p < 0,001$, et U18 vs U20 : $-16,5 \pm 5,1$ kg, $p < 0,001$), la force du bas du corps ($-27,6 \pm 7,7$ kg, $p < 0,001$, $-49,5 \pm 12,8$ kg, $p < 0,001$, et $-21,9 \pm 12,0$ kg, $p < 0,001$, respectivement) et la puissance du bas du corps ($-3,1 \pm 1,2$ cm, $p < 0,001$, $-5,0 \pm 1,8$ cm, $p < 0,001$, et $-1,9 \pm 1,7$ cm, $p < 0,05$, respectivement).

L'ANOVA a révélé une interaction significative entre la catégorie et le statut pour le développé couché pour les deux postes. L'analyse du post-hoc a révélé des différences entre U16 INT et U18 INT et U20 NI, et U18 INT et U18 NI, et U20 INT pour les avants et les arrières (Tableau 4.2 et Tableau 4.3, respectivement). Les analyses post-hoc n'ont révélé aucune différence significative entre U16 INT et U16 NI et U20 INT et U20 NI.

Tests sur le terrain

L'analyse des capacités aérobies a révélé un effet catégorie significatif pour les deux postes ($p < 0,01$ - $p < 0,001$), et un effet de statut, mais uniquement pour les joueurs arrières. Le test post-hoc a indiqué une différence significative entre les arrières INT et NI ($+0,6 \pm 0,4 \text{ km.h}^{-1}$, $p < 0,01$), et entre les avants U16 et U18 ($-0,6 \pm 0,3 \text{ km.h}^{-1}$, $p < 0,001$).

L'analyse du temps au sprint sur 10 m a révélé un effet significatif de la catégorie et du statut dans les deux groupes ($p < 0,05$ - $p < 0,001$). Les tests post-hoc ont indiqué des différences significatives entre les joueurs INT et NI pour les avants et les arrières ($-0,03 \pm 0,02 \text{ s}$, $p < 0,01$, et $-0,04 \pm 0,02 \text{ s}$, $p < 0,001$, respectivement). Des différences significatives ont été observées entre les avants U16 et U18, et U20, et entre les avants U18 et U20 pour les temps au sprint sur 10 m (U16 vs U18 : $+0,03 \pm 0,02 \text{ s}$, $p < 0,01$, U16 vs U20 : $+0,07 \pm 0,03 \text{ s}$, $p < 0,001$, et U18 vs U20 : $+0,04 \pm 0,03 \text{ s}$, $p < 0,01$). L'analyse du temps au sprint sur 10 m chez les arrières a révélé des différences significatives entre U16 et U18 et U20 ($+0,02 \pm 0,02 \text{ s}$, $p < 0,05$, et $+0,04 \pm 0,03 \text{ s}$, $p < 0,05$).

L'analyse des temps au sprint sur 50 m a révélé un effet significatif de la catégorie pour les deux postes ($p < 0,001$) et du statut uniquement pour les arrières ($p < 0,001$). Les tests post-hoc ont indiqué une différence significative entre les arrières INT et NI ($-0,14 \pm 0,07 \text{ s}$, $p < 0,001$). Des différences significatives ont été observées entre les avants U16 et U18, et U20 pour les temps au sprint sur 50 m ($+0,21 \pm 0,10 \text{ s}$, $p < 0,001$, et $+0,33 \pm 0,15 \text{ s}$, $p < 0,001$). L'analyse des temps au sprint sur 50 m chez les arrières a révélé des différences significatives entre les U16 et U18, et les U20 ($+0,14 \pm 0,06 \text{ s}$, $p < 0,001$, et $+0,18 \pm 0,11 \text{ s}$, $p < 0,001$).

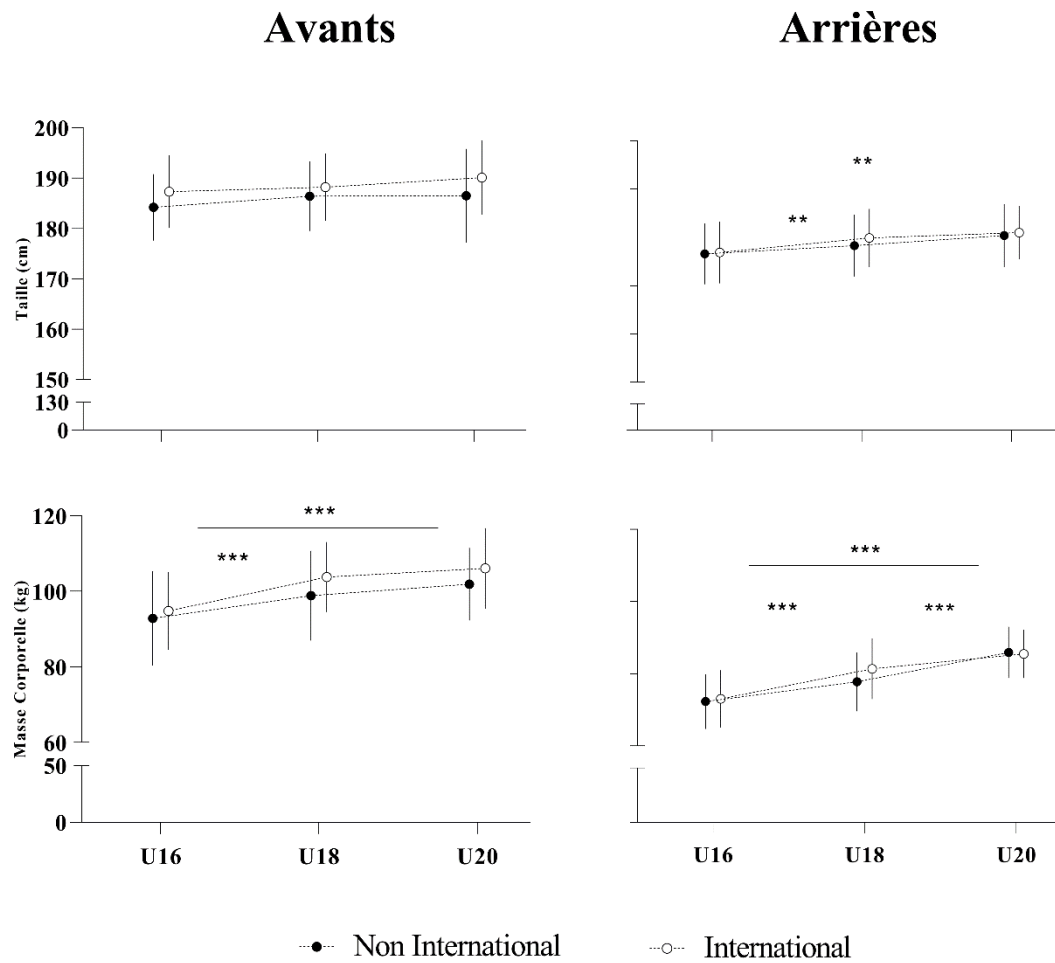


Figure 4.3 : Représentation graphique des caractéristiques anthropométriques des joueurs U16, U18 et U20 en fonction du statut et du poste.

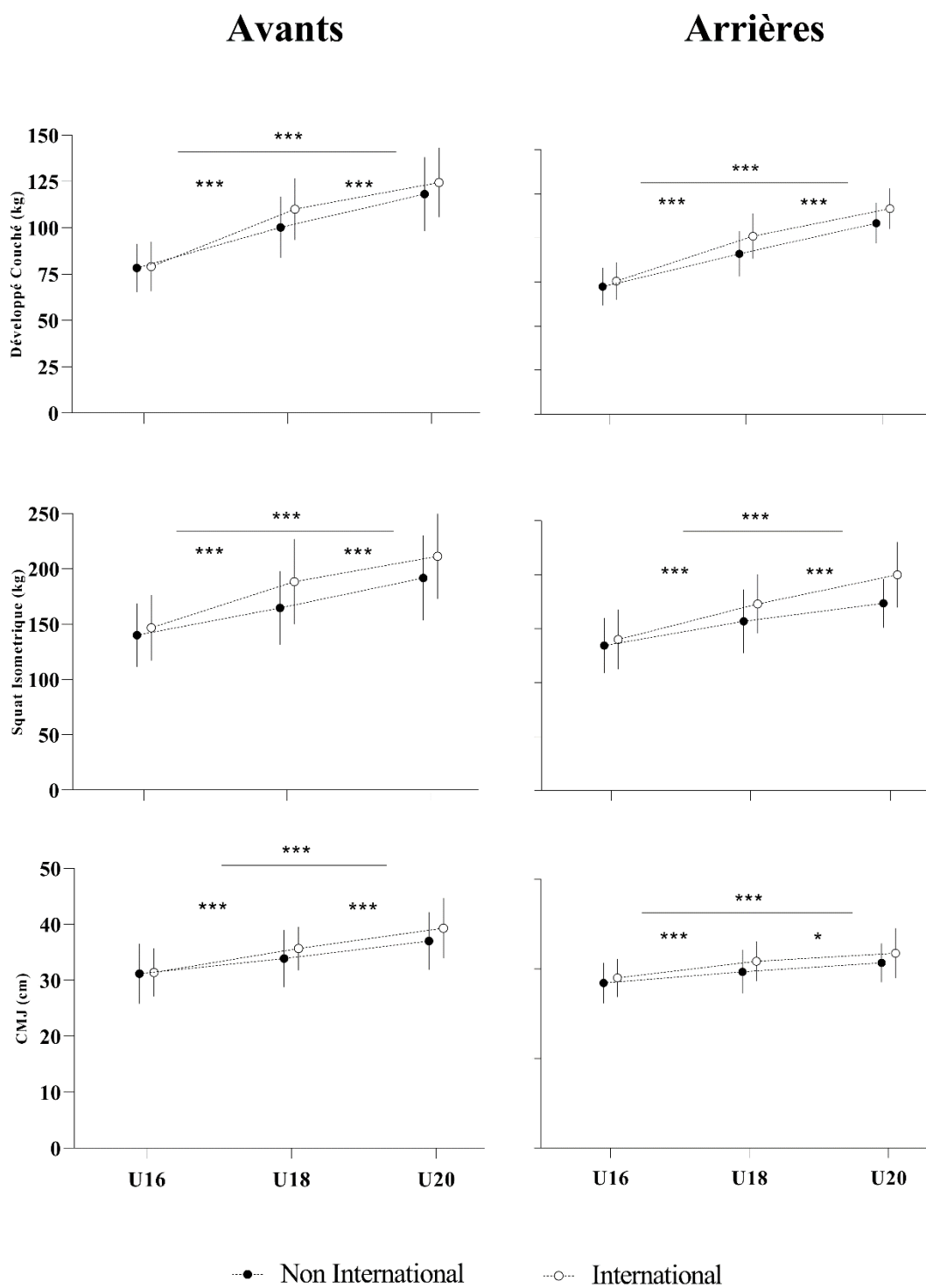


Figure 4.4 : Représentation des caractéristiques de force et de puissance des joueurs U16, U18 et U20 en fonction du statut et du poste.

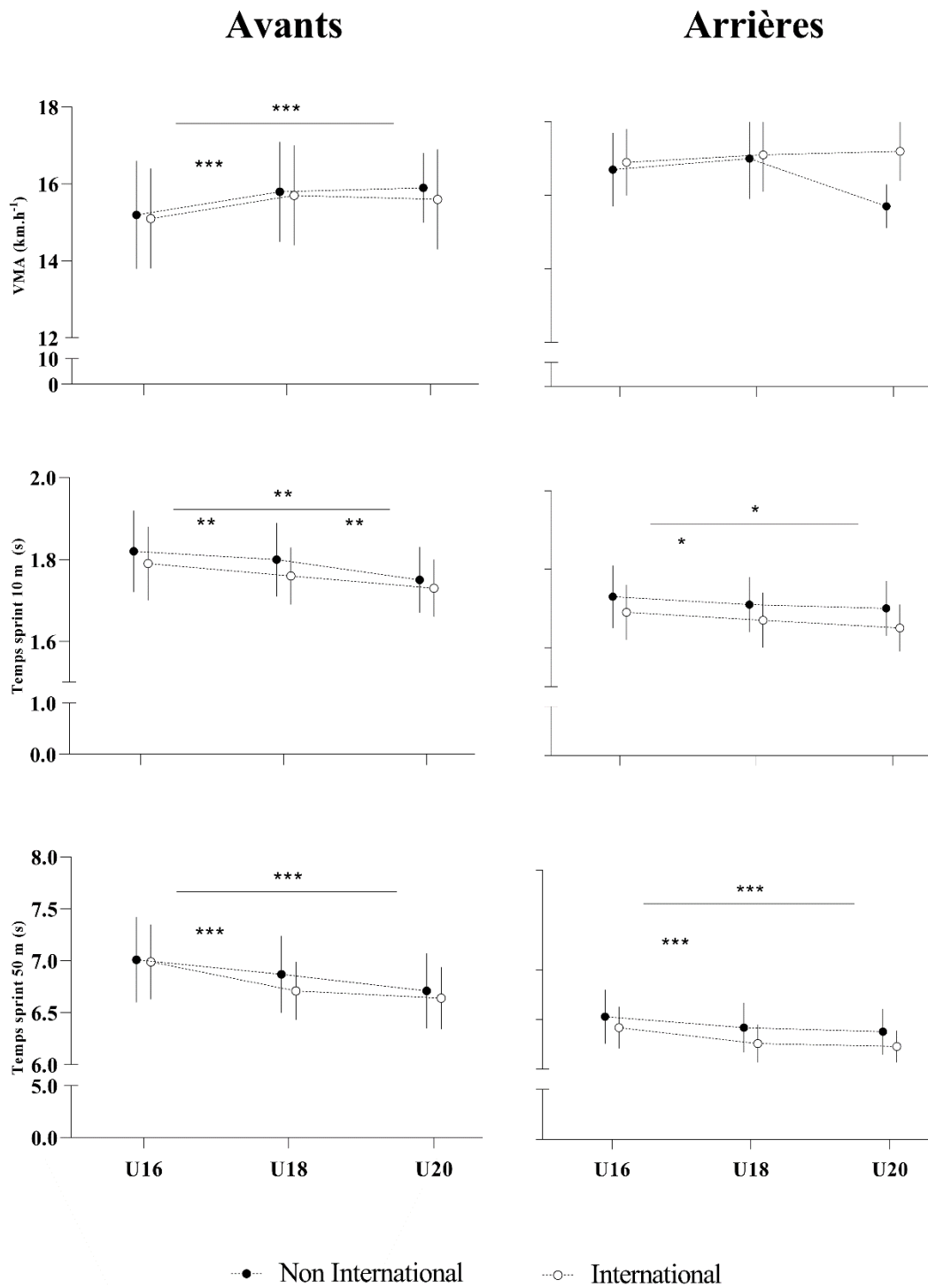


Figure 4.5 : Représentation des caractéristiques aérobies et de vitesse des joueurs U16, U18 et U20 en fonction du statut et du poste.

4.4. DISCUSSION

L'objectif principal de cette étude était de comparer les caractéristiques anthropométriques (taille et masse corporelle) et physiques (force, puissance, capacités aérobies, vitesse) des joueurs de rugby à XV français dans trois catégories d'âge (à savoir les moins de 16 ans, les moins de 18 ans et les moins de 20 ans) et pour deux postes (avants et arrières). Un deuxième objectif majeur était de comparer ces caractéristiques chez les joueurs internationaux et non internationaux. Les résultats des tests ont montré qu'un effet de l'âge était presque systématiquement observé pour les deux postes. Dans les comparaisons par paires entre U16, U18 et U20, les joueurs plus âgés étaient généralement plus grands, plus lourds, plus forts, plus rapides et démontraient de meilleures qualités aérobies que leurs pairs plus jeunes. Les résultats ont également mis en évidence que les joueurs INT étaient plus rapides, plus forts, plus puissants et démontraient de meilleures capacités aérobies que les joueurs NI, tandis que les avants INT étaient également plus grands et plus lourds que leurs pairs NI.

Caractéristiques anthropométriques

La présente étude a démontré une différence significative de taille et de masse corporelle entre les catégories d'âge (U16, U18 et U20) et pour les deux postes. Logiquement, les joueurs plus âgés étaient généralement plus grands et plus lourds que leurs pairs plus jeunes. En effet, une étude précédente menée auprès de jeunes joueurs d'académies anglaises a observé un schéma similaire avec une augmentation des caractéristiques anthropométriques entre les catégories U16, U18 et U21 (Darrall-Jones et al. 2015). Cela s'explique probablement par la trajectoire de croissance et de maturation qui suit un pic de taille, qui est influencée par de fortes augmentations de testostérone au cours de cette période (Vänttinen et al. 2011). Pour renforcer cette suggestion concernant les effets de la maturation, des changements plus importants dans

les caractéristiques anthropométriques ont été observés entre les joueurs des catégories U16 à U18 que ceux des catégories U18 à U20, et pour les deux postes.

À notre connaissance, la présente étude est la première à comparer les caractéristiques anthropométriques des jeunes joueurs de rugby à XV INT et NI. Les résultats ont révélé que les joueurs INT étaient plus lourds que les joueurs NI, et que seuls les avants INT étaient plus grands que leurs pairs. Une étude portant sur l'effet du niveau de jeu a comparé des joueurs d'académies de clubs professionnels anglais avec des joueurs d'un niveau scolaire, et a révélé que les joueurs d'académies étaient plus grands et plus lourds que les joueurs d'un plus bas niveau (Jones et al. 2018). Des résultats similaires ont été observés chez les joueurs seniors professionnels et non professionnels de rugby à XV, bien que, contrairement à la présente étude, les auteurs n'aient pas examiné le poste (Argus et al. 2012). En effet, dans notre étude, la taille et la masse corporelle étaient des facteurs de différenciation des joueurs avants INT. Compte tenu de la charge de contacts élevée à laquelle les avants sont confrontés dans le rugby d'élite (Quarrie and Hopkins 2007), et de l'accent mis sur le développement de la force et de la puissance à ces postes, ces différences étaient prévisibles. Par conséquent, le suivi et le développement de la masse corporelle chez les avants en particulier, semblent être importants pour l'identification des talents et tout au long du parcours de formation. En revanche, le même effet n'a pas été observé chez les arrières, ce qui suggère que les qualités anthropométriques pourraient ne pas être des facteurs discriminants pour ces postes spécifiques chez les jeunes.

Tests en salle

Des différences significatives ont été observées pour la force et la puissance du haut et du bas du corps dans les deux postes, les joueurs devenant plus forts et plus puissants avec l'âge. Nos résultats, pour les joueurs U16 et U20, présentaient des valeurs similaires ou supérieures pour la force du haut et du bas du corps à celles rapportées chez des joueurs néozélandais U16 et

U21 (Argus et al. 2012). En outre, les auteurs ont révélé des différences similaires entre les catégories d'âge, les joueurs plus âgés ayant tendance à être plus forts que leurs homologues plus jeunes (Argus et al. 2012). Des différences entre les catégories d'âge ont également été observées dans les académies anglaises entre les joueurs U16, U18 et U21 (Darrall-Jones et al. 2015). En prenant en considération les changements de maturation mentionnés ci-dessus ainsi que l'augmentation de la charge de travail à l'entraînement commune aux catégories d'âge plus élevées (Phibbs et al. 2018b). Il n'est donc pas surprenant d'observer des tendances similaires entre les groupes d'âge dans la présente étude.

À notre connaissance, cette étude est la première à mettre en évidence des différences dans les caractéristiques de force et de puissance entre les joueurs INT et NI. Les recherches précédentes de Jones et al. (2018) ne s'étaient seulement concentrées sur l'identification des différences chez des jeunes joueurs U18 évoluant au niveau scolaire par rapport aux U18 d'académies de clubs professionnels. L'interaction statistique significative entre l'âge du joueur et le statut concernant la force du haut du corps suggère que cela pourrait être un indicateur clé lors du suivi des changements dans la performance physique tout au long d'un parcours de développement des joueurs nationaux. De plus, il n'est pas surprenant d'observer que les valeurs de la force et de la puissance du bas du corps étaient plus faibles chez les joueurs nationaux, ce qui suggère l'importance de l'entraînement du bas du corps pour évoluer au niveau jeunes INT. Les différences entre les joueurs INT et NI peuvent s'expliquer par de multiples facteurs intrinsèques (génétique, formation, etc.) et extrinsèques (développement individuel, politique des clubs, etc.). On peut supposer que l'attention particulière accordée par les clubs et la fédération aux joueurs INT, en termes de suivi et de prescription de charge d'entraînement et d'individualisation du contenu de l'entraînement, a contribué à favoriser leur développement. L'observation selon laquelle les joueurs INT étaient plus forts que leurs homologues du niveau national est à noter et est importante pour les clubs comme pour la FFR en termes

d'identification et de développement des joueurs dans leur parcours vers haut niveau et pour les entraîneurs dans le cadre de leur politique de sélection en équipes nationales.

Tests sur le terrain

En comparaison avec les qualités physiques susmentionnées, très peu de différences statistiques ont été observées concernant les valeurs de VMA, que ce soit entre les statuts ou entre les catégories d'âge, malgré la tendance des valeurs à augmenter avec l'âge chez les joueurs internationaux. Ces résultats peuvent être comparés à ceux de Darrall-Jones et al. (2016a), dont le rapport indique que la capacité aérobie dans un club de rugby professionnel est restée assez stable de U16 jusqu'en sénior. Les auteurs ont suggéré que la capacité des joueurs à effectuer des courses de haute intensité augmentait néanmoins avec l'âge, bien que cela ne se traduise pas par une plus grande performance notamment en raison de l'effet néfaste de la masse corporelle lors des changements de directions. Malgré les différences dans le protocole de test que l'on a utilisé (c'est-à-dire test continu vs changements de directions), nous pouvons suggérer que l'augmentation de la masse corporelle liée à l'âge aurait pu avoir un effet négatif similaire sur la performance de VMA des joueurs actuels en raison du coût énergétique accru lié aux changements progressifs de vitesse pendant le test (Darrall-Jones et al. 2016a). Les praticiens qui travaillent avec de jeunes joueurs doivent tenir compte des changements de masse corporelle lorsqu'ils analysent l'évaluation des capacités énergétiques à travers les âges, en prenant également en compte le protocole utilisé, l'analyse des résultats au regard de référence d'âge ou de poste ou encore l'orientation de la charge de travail.

Des recherches antérieures ont montré que la performance de sprint chez les joueurs U16 notamment peut discriminer la progression de carrière au plus haut niveau (Fontana et al. 2017). Cependant, une récente méta-analyse (Owen et al. 2020) n'a révélé aucune différence dans les temps au sprint ≤ 10 m des joueurs U16 à U20 à travers différents niveaux de pratique (du

niveau scolaire au niveau national). Dans notre étude, la vitesse de course sur de courtes distances (c'est-à-dire 10m) était significativement différente en fonction de l'âge et du statut et pour les deux postes. Ce résultat implique que les jeunes joueurs actuels deviennent non seulement plus rapides avec le temps, mais que ceux qui ont atteint le niveau international étaient plus rapides. Ce résultat est notable, car la vitesse de course linéaire est associée aux mètres parcourus, au nombre de franchissements et de plaquages cassés dans les matchs de rugby à XV de haut niveau (Smart et al. 2014, Owen et al. 2020). Il faut également noter le plateau observé chez les avants et les arrières entre U18 et U20 sur des distances plus longues (de ≥ 10 à 50 m), les arrières INT étant plus rapides que les joueurs NI. Ces résultats s'alignent en partie sur les conclusions de la récente méta-analyse susmentionnée qui n'a pas montré de différence claire sur des sprints de plus longues distances chez les joueurs de rugby à XV de différentes catégories d'âge pour tous les postes (Owen et al. 2020). En outre, Barr et al. (2014) ont démontré que la performance de sprint ne s'améliorait pas entre le niveau international U20 et le niveau international sénior. Ces résultats, associés à une plus grande force du bas du corps rapportée chez les joueurs professionnels séniors par rapport à leurs pairs U20 (Argus et al. 2012), suggèrent que les praticiens doivent se concentrer sur le transfert de la force vers le sprint tout en respectant les composants techniques clés pour améliorer la performance du sprint. Ainsi, les praticiens doivent être attentifs au fait qu'en raison de la croissance, le développement de membres plus longs peut influencer la longueur et la fréquence des foulées, améliorant ainsi la performance de sprint à un jeune âge (< 16 ans) (Owen et al. 2020), qui est ensuite suivie d'une période d'augmentation rapide de la masse (> 16 ans) où le développement des qualités de vitesse est réduit (Owen et al. 2020). De plus, la contrainte de la masse corporelle sur le développement de la vitesse a été soutenue par Casserly et al. (2019) qui ont suggéré que de petites augmentations de la masse corporelle agissent comme un médiateur du développement de la vitesse des catégories U18 à U20, expliquant le plateau observé lors des temps au sprint de longue distance. Par conséquent, la performance sur des distances de vitesse plus courtes

(sprint < 10 m) pourrait sans doute être considérée comme un indicateur plus pertinent pour identifier les potentiels futurs joueurs internationaux.

4.4.1. Limites

Cette étude présente des limites. Tout d'abord, les données rétrospectives d'une batterie de tests nationale mise en place par la FFR a été utilisée, le nombre et le choix des tests étaient donc restreints et limitent potentiellement l'impact des résultats. Par exemple, seule la masse corporelle a été utilisée alors que des informations relatives à la composition corporelle auraient sans doute permis de mieux comprendre les différences observées entre les groupes. Deuxièmement, l'enquête actuelle n'incluait pas d'informations relatives aux joueurs séniors INT ou NI. En effet, il reste à observer comment les qualités physiques des jeunes joueurs français actuels évoluent vers les niveaux séniors (internationaux ou nationaux). La connaissance de cette progression aiderait une organisation comme la FFR à tracer le paysage global du profil physique de ses joueurs et pourrait permettre une identification plus précoce des futurs joueurs internationaux. Troisièmement, des données limitées étaient disponibles concernant les U20 (n <100). Cela peut s'expliquer par un manque d'accès aux joueurs nationaux de cette tranche d'âge, car ils étaient souvent intégrés au groupe professionnel et n'étaient pas sélectionnés pour faire partie de l'équipe nationale U20. Enfin, les études futures pourraient inclure des informations sur les réponses aux doses de charge d'entraînement afin d'approfondir les connaissances sur les différences et l'évolution observées selon les catégories d'âge et le statut.

4.4.2. Conclusion

L'objectif de la présente étude était d'évaluer et de comparer les caractéristiques anthropométriques et physiques entre les catégories d'âge et les statuts (INT et NI). Les principaux résultats ont révélé une nette progression des caractéristiques anthropométriques et qualités physiques tout au long du parcours de développement des jeunes joueurs français et de leur progression vers le niveau international. Ceci met en évidence l'efficacité de la filière française de rugby à XV qui permet aux joueurs de devenir plus grands, plus forts et plus rapides au fil du temps. La batterie de tests utilisée a permis d'identifier les futurs jeunes joueurs internationaux. Les études futures pourraient inclure la composition corporelle ou les réponses aux doses de charge d'entraînement pour améliorer la compréhension de nos résultats. Aussi, maintenant que nous avons pu décrire spécifiquement les qualités physiques des jeunes internationaux, il nous semble pertinent de les contextualiser dans les conditions d'un match de rugby et ainsi évaluer comment s'expriment ces qualités physiques sur le terrain au travers d'une analyse fine des exigences physiques liées au déplacement et à l'activité combattue lors des rencontres internationales U18 et U20.

4.5. APPLICATIONS PRATIQUES

- Des différences dans les caractéristiques anthropométriques ont été observées en fonction de l'âge et du statut des joueurs. Par conséquent, les organisations comme la FFR pourraient considérer les caractéristiques anthropométriques comme des indicateurs initiaux et simples pour suivre les joueurs tout au long de leur parcours.

- En ce qui concerne les tests en salle, les mesures de la force du haut du corps évaluée par le biais du développé couché ont mis en évidence des différences entre les catégories d'âge et le statut. Par conséquent, ce test pourrait également être utilisé de manière longitudinale pour aider à identifier, sélectionner et développer les potentiels joueurs INT.

- Les performances de vitesse sur de courtes distances (sprint >10 m) semblent être plus appropriées pour distinguer la performance physique des joueurs INT par rapport aux joueurs NI. En revanche, la vitesse sur des distances plus longues telles que 50 m semble être spécifique aux joueurs arrière. Une attention particulière doit être accordée aux qualités d'accélération et de vitesse lorsqu'il s'agit d'identifier les talents et les développer.

ÉTUDE 2 :

UNE COMPARAISON DES DEMANDES PHYSIQUES DE
DÉPLACEMENT ET DE CONTACT DANS LES
COMPÉTITIONS INTERNATIONALES U18 ET U20 DE
RUGBY À XV.

Peeters, A., Piscione, J., Lacombe, M., Carling, C., Babault, N. (2023).
A comparison of running and contact loads in U18 and U20
international rugby union competition. *Biology of Sport*. 40(1):149-
160. *Accepté.*

5.1. INTRODUCTION

Le rugby à XV est considéré comme l'un des sports d'équipe les plus intenses et les plus exigeants physiquement (Cummins et al. 2013). Au niveau de l'élite sénior, un ensemble complet de recherches a quantifié les exigences physiques en match (Roberts et al. 2008, Cunniffe et al. 2009, Cahill et al. 2013, Quarrie et al. 2013, Lacombe et al. 2017). Les analyses utilisant des technologies telles que les systèmes de positionnement global (GPS) montrent que le jeu est intermittent par nature (Jones et al. 2015). Les joueurs effectuent de fréquentes séquences de course à haute vitesse et réalisent d'intenses collisions telles que des plaquages et des phases statiques comme des mêlées, des rucks et des mauls (Lacombe et al. 2014). En revanche, il existe moins d'informations (Read et al. 2017b, Read et al. 2018a) sur les exigences du niveau élite jeune, notamment international, et sur la manière dont elles évoluent potentiellement entre les différentes catégories d'âge. Une évolution et donc des différences auxquelles nous pouvons nous attendre au regard des résultats présentés dans l'Etude 1, où nous avons démontré de nettes améliorations des qualités physiques avec l'âge (comme par exemple la vitesse, la force, la puissance) associées à une augmentation des caractéristiques anthropométriques (notamment de la masse corporelle). Ces observations sont à mettre en lien avec une comparaison des exigences physiques entre les compétitions de rugby à XV amateur U18 et U20 a révélé que les joueurs les plus jeunes parcouraient de plus grandes distances par minute (Read et al. 2017b). Les études décrivant les exigences physiques des compétitions U18 sont principalement centrées sur des joueurs anglais évoluant au niveau national, régional ou scolaire U18 (Read et al. 2017a, Read et al. 2017b, Read et al. 2018a). Par conséquent, une comparaison de la charge externe (déplacements et événements de contact) dans les compétitions internationales U18 et U20 permettrait de savoir si le niveau U18 constitue une étape appropriée pour préparer physiquement les joueurs aux exigences U20. En outre, les connaissances sont limitées quant à savoir si la demande physique en matière de déplacement dans les matchs internationaux U20 est suffisante pour préparer les joueurs au rugby

international sénior (Cunningham et al. 2016b). De telles informations pourraient notamment aider à cibler les demandes physiques spécifiques (déplacements et combat) que les jeunes joueurs doivent travailler pour poursuivre leur progression (Cunningham et al. 2016b).

Un nombre important d'études ont rapporté les exigences moyennes des matchs de rugby à XV, généralement sur 80 minutes ou par mi-temps (Lacome et al. 2017, Reardon et al. 2017b). Pourtant, étant donné la nature fluctuante des exigences de course, les moyennes sur l'ensemble du match ne reflètent pas les pics d'intensité atteints par intermittence tout au long du match. La connaissance des efforts maximaux pendant les séquences pics du match fournit des informations permettant de préparer au mieux les joueurs à faire face aux exigences les plus élevées de la compétition, souvent appelées en anglais les " worst-case scenarios" (Whitehead et al. 2018). Le volume et l'intensité lors de l'entraînement peuvent être spécifiquement référencés par rapport à ces périodes d'activité maximale afin de s'assurer que le stimulus physique souhaité soit atteint à la fois pour le groupe dans son ensemble et pour les différents postes. Deux méthodes sont généralement utilisées pour fournir des informations clés sur les périodes de jeu les plus exigeantes : les efforts physiques pendant de courtes époques - fixes et mobiles, généralement d'une durée de 1 à 10 minutes (Delaney et al. 2017b, Cunningham et al. 2018a), et les séquences continues de temps de jeu effectif (TJE) déterminées en fonction de la durée totale de la séquence (Reardon et al. 2017b, Pollard et al. 2018, Read et al. 2018b, Read et al. 2019). Quelle que soit la méthode employée, ces périodes présentent généralement des différences substantielles par rapport aux exigences moyennes de l'ensemble du match. Cependant, alors que le rugby à XV est un sport d'équipe à dominante de contact, aucune étude n'a, à notre connaissance, tenté de caractériser et de comparer les pics d'exigence de l'activité de déplacement et de combat (collisions) de manière concomitante, et notamment en compétition internationale U18 et U20. De telles informations pourraient servir de base à l'élaboration d'exercices de préparation physique dissociés et intégrés avec des jeux à effectif

réduit, pour l'ensemble du groupe et pour les différents groupes de postes en particulier pour les catégories les plus jeunes.

Le but de la présente étude était de caractériser et de comparer l'exigence de déplacement et de contact dans les compétitions internationales de rugby à XV des U18 et U20 pendant tout le match et pendant les phases d'activité maximale du match, y compris les séquences continues de TJE et les séquences maximales glissantes. En tenant compte des résultats d'une revue de Till et al. (2020), montrant que les jeunes joueurs effectuent des déplacements plus importants au niveau académie ou scolaire, il a été supposé que même au niveau international, les joueurs U18 effectueraient plus déplacements que leurs pairs U20, tandis que ces derniers effectueraient plus d'évènements de contacts (Till et al. 2020).

5.2. MÉTHODE

5.2.1. Approche expérimentale du problème

Les charges externes représentées par l'activité de déplacement et le nombre de collisions ont été étudiées chez les jeunes joueurs internationaux français de rugby U18 et U20 pendant des matchs officiels à l'aide d'un GPS et d'un logiciel d'analyse vidéo (SportsCode) respectivement. Les données ont été collectées lors de 20 matchs internationaux : les U18 ont joué 9 matchs pendant le Tournoi des Six Nations U18 (7 matchs) et le Aon® U18 International Series (2 matchs) tandis que les U20 ont joué un total de 11 matchs, dont 9 dans le Tournoi des Six Nations U20 et 2 lors de la Coupe du Monde de Rugby U20. Les données ont été collectées lors des matchs de ces tournois sur trois saisons successives : 2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019. L'activité de déplacement et les collisions ont été analysées sur l'ensemble du match, et sur des séquences de jeu fixes lors du TJE et lors des séquences pics (mesurées avec des moyennes glissantes).

5.2.2. Participants

Au total, 105 joueurs ont participé à la présente étude (U18, n= 49 ; U20, n= 56). Ils ont été répartis en groupes de poste avant (U18, n= 29 ; U20, n= 32) et arrière (U18, n= 20 ; U20, n= 24). L'âge et les caractéristiques anthropométriques des participants sont indiqués dans la Tableau 5.1.

Afin de garantir la confidentialité des joueurs, toutes les données de performance ont été anonymisées avant l'analyse. Avant de participer, tous les joueurs ont reçu des explications verbales et écrites complètes sur l'étude. Bien que les données aient été recueillies dans le cadre de la participation des joueurs à leurs sélections nationales respectives, où ils ont fait l'objet d'un suivi quotidien pendant les camps d'entraînement et les compétitions, un consentement éclairé écrit a été obtenu pour participer à l'étude, avec un accord parental ou du tuteur pour les joueurs de moins de 18 ans, conformément aux recommandations de la Déclaration d'Helsinki. L'autorisation de l'étude a également été obtenue auprès du conseil scientifique de la recherche de la FFR.

Tableau 5.1 : Âge et caractéristiques anthropométriques des joueurs U18 et U20.

	U18	U20
Avants		
n	29	32
Âge (ans)	17,8 ± 0,5	19,5 ± 0,6
Taille (cm)	187,0 ± 8,2	190,6 ± 6,7
Masse (kg)	104,2 ± 11,1	110,7 ± 9,6
Observations/match	44	68
Arrières		
n	20	24
Âge (ans)	18,0 ± 0,3	19,5 ± 0,7
Taille (cm)	178,9 ± 4,6	180,7 ± 6,4
Masse (kg)	82,6 ± 7,9	85,2 ± 6,8
Observations/match	28	45

(Moyenne ± ET)

5.2.3. Procédures de collecte des données

L'activité de déplacement

Les joueurs portaient un dispositif de suivi GPS portable (SensorEverywhere V3, Digital Simulation, France), échantillonnant à 16Hz. Le GPS était placé dans une poche personnalisée dans le maillot et situé entre les omoplates. Pour limiter la potentielle variabilité entre les unités, chaque joueur portait la même unité pendant toute la durée de chaque compétition. Trente minutes avant le début de chaque match, les unités GPS étaient allumées pour assurer une réception satellite claire. Les données ont été saisies et calculées à l'aide du logiciel SensorEverywhere Analyser (Digital Simulation, Paris, France). Les données étaient exclues si l'un des critères suivants était rempli : nombre de satellites <6, dilution horizontale de la précision (HDOP) >2,3 et inspection visuelle des signaux bruts de vitesse montrant des irrégularités (Malone et al. 2017). Le nombre moyen de satellites et le HDOP pendant le match étaient respectivement de 10 ± 2 et $1,7 \pm 0,4$. Des recherches récentes évaluant la fiabilité interunités des dispositifs GPS SensorEverywhere ont démontré une différence triviale pour l'erreur typique de mesure et une petite différence pour la vitesse maximale de sprint ($0,5 \pm 0,1\%$) et l'accélération maximale ($3,9 \pm 0,6\%$) respectivement (Lacome et al. 2019).

L'activité de combat

Un opérateur formé a codé les actions du match liées au contact, notamment les plaquages, les rucks, les collisions du porteur de balle, les mauls et les mêlées à l'aide d'un logiciel d'analyse vidéo (SportsCode Elite, version 10, Hudl, États-Unis). La participation active à une mêlée a été considérée comme provenant de l'engagement de la première ligne jusqu'à ce qu'un joueur soit détaché après la libération du ballon (Roberts et al. 2008). Les 3^{èmes} lignes ont été exclus

du codage de la mêlée. La participation active aux phases de ruck et de maul a été codée à partir du moment où l'épaule du joueur entrait en contact avec le ruck ou le maul jusqu'à ce qu'il s'en détache (Lacome et al. 2014). Les plaquages sont considérés comme des actions où un joueur tente d'arrêter physiquement le porteur de balle alors qu'il est debout (Lacome et al. 2014). Les collisions ont été comptabilisées lorsqu'un contact physique a eu lieu entre un attaquant et un défenseur (Gabbett et al. 2011).

L'opérateur a également utilisé le logiciel d'analyse vidéo pour quantifier le temps où le ballon en jeu (temps de jeu effectif (TJE)), car ce facteur contextuel influence le déplacement et la performance des joueurs en sport collectif (Carling and Dupont 2011). Les variables contextuelles relatives aux matchs sont présentées dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Variables contextuelles des matchs étudiés

	U18	U20
Victoire (n) / Défaite (n)	8 / 1	8 / 3
Victoire % / Défaite %	89% / 11%	73% / 27%
Possession adverse %	51,5 ± 7,4	49,4 ± 8,4
Possession France %	48,5 ± 7,4	50,6 ± 8,4
Nombre total d'essais	7,2 ± 2,2	7,4 ± 4,2
Nombre d'essais adverse	2,6 ± 1,2	2,7 ± 2,5
Nombre d'essais France	4,7 ± 1,7	4,6 ± 3,5
Nombre total de points	51,9 ± 12,8	56,9 ± 23,2
Nombre de points adverse	20 ± 7,4	21,5 ± 14,8
Nombre de points France	31,9 ± 8,1	35,4 ± 22,1

(Moyenne ± ET)

Traitement des données

Pour synchroniser les données relatives au déplacement et au contact, un marqueur temporel a été créé dans les logiciels GPS et d'analyse vidéo au moment du coup d'envoi (lors du contact entre le ballon et le sol). Les données relatives aux contacts ont ensuite été importées du logiciel Sportscodex dans le logiciel GPS.

Trois zones arbitraires d'intensité de course ont été utilisées pour analyser les données de déplacement mesurées en mètres (m) : distance totale (DT), distance à haute vitesse (DHV, vitesse $>4 \text{ m.s}^{-1}$) et distance à très haute vitesse (DTHV, vitesse $>7 \text{ m.s}^{-1}$) (Tee and Coopoo 2015, Dubois et al. 2017). La charge de course a également été évaluée à l'aide du nombre total d'accélération réalisées (actions $>2,5 \text{ m.s}^{-2}$) (Peeters et al. 2019). Enfin, des informations sur le nombre concomitant de collisions ont également été fournies.

Les données de déplacement et les événements de contact ont été utilisés pour déterminer l'exigence physique des matchs internationaux et les comparer entre les joueurs U18 et U20 en utilisant trois approches :

- 1) Analyse de l'activité moyenne de déplacement et de contact lors du match (les données n'ont été incluses que si les joueurs ont effectué au moins une mi-temps du match).
- 2) Analyse des séquences de temps de jeu effectif (TJE) : la fréquence d'occurrence des séquences de TJE pour des durées inférieures à 30 s, comprises entre 30 et 60 s, 60 à 90 s, 90 à 120 s et supérieures à 120 s a été déterminée. Les données de déplacement et de contact concomitant pour les séquences de TJE de plus de 90 s sont présentées. Les données pour toutes les autres séquences sont présentées en ANNEXE, sauf les séquences très courtes ($<30 \text{ s}$) qui n'ont pas été analysées afin d'éviter une représentation biaisée de l'intensité (Pollard et al. 2018).
- 3) Les séquences pics d'activité : la distance totale et les événements de contact codés par l'opérateur ont été utilisés séparément pour définir les périodes de locomotion et de contact

maximales pendant les périodes pics d'activité. Une moyenne mobile de 30 s et 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12 et 15 min avec un pas de 1/16 s a été utilisée (Read et al. 2019).

5.2.4. Analyse statistique

Les données sont présentées sous forme de moyennes \pm écarts types (ET). Une approche de décision basée sur la magnitude a été adoptée pour l'analyse statistique (Batterham and Hopkins 2006, Winter et al. 2014). Les comparaisons des performances des U18 et des U20 et entre les postes de jeu ont été calculées avec des intervalles de confiance à 90 % (IC 90 %) à l'aide de feuilles de calcul Excel spécialement conçues (Hopkins 2007). Les chances de changements plus ou moins importants dans les variables de performance ont été évaluées qualitativement et rapportées comme suit : 75-97,5 %, probable ; 97,5-99 %, très probable ; >99 %, presque certain (Hopkins et al. 2009). Les tailles d'effet (TE) ont été quantifiées pour indiquer la significativité des différences avec les valeurs moyennes. La taille de l'effet a été classée en trois catégories : insignifiant ($<0,2$), petit ($>0,2-0,6$), modéré ($>0,6-1,2$), grand ($>1,2-2,0$) et très grand ($>2,0-4,0$) (Batterham and Hopkins 2006). Si l'IC à 90 % chevauche des valeurs positives et négatives, l'ampleur a été jugée incertaine. Les chances que les changements dans la charge externe (course ou contact) soient plus importants pour un groupe (c'est-à-dire supérieurs au plus petit changement valable, SWC [0,2 multiplié par l'écart type entre les sujets, sur la base du principe du d de Cohen]), similaires ou inférieurs à ceux de l'autre groupe, ont été calculées.

5.3. RÉSULTATS

1) Analyse de l'activité moyenne du match.

Les résultats (Tableau 5.3) montrent que, collectivement, les joueurs U18 ont couvert plus de DT et de DHV et effectué plus d'accélération que leurs homologues U20. La DT et la DHV étaient presque certainement plus élevées chez les avants U18 par rapport aux avants U20. La DTHV était probablement plus élevée chez les avants U18. Les arrières appartenant aux U18

ont montré des valeurs plus élevées pour la DT, la DHV et le nombre d'accélération que leurs pairs U20. Des différences peu claires pour le DTHV ont été observées entre les arrières U18 et U20. Les différences dans la fréquence des contacts n'étaient pas claires entre les niveaux U18 et U20, indépendamment du poste occupé.

Aucune différence claire n'a été observée pour le pourcentage de temps de jeu effectif en match entre les deux catégories d'âge.

2) Analyse des séquences de temps de jeu effectif.

Dans les matchs des U18, plus de la moitié des séquences de TJE (Figure 5.1) duraient moins de 30 secondes, ce qui est probablement supérieur aux valeurs observées dans les compétitions des U20 ($53,5 \pm 4,9\%$ vs $48,8 \pm 7,9\%$, $TE = -0,67 \pm 0,74$). L'analyse des séquences plus longues $[60\text{ s}; 90\text{ s}[$ a montré une distribution inversée, car probablement plus de séquences ont été observées dans les matchs U20 par rapport aux matchs U18 ($TE = 1,04 \pm 0,74$). Aucune différence dans la fréquence des séquences $[90\text{ s}; 120\text{ s}[$ n'a été observée entre les groupes d'âge. Un nombre nettement plus élevé de séquences d'une durée $>120\text{ s}$ a été signalé dans les matchs U20 ($TE = 1,02 \pm 0,74$).

Tableau 5.3 : Comparaisons de l'activité de course et de contact par minute de jeu entre les joueurs U18 et U20 pour l'ensemble de l'équipe et pour les postes d'avants et d'arrières.

TOUS LES JOUEURS	U18	U20	U20 vs U18		
			%Diff 90%IC	TE ± 90%IC	%Chance
% TJE	38,6 ± 3,2 %	38,7 ± 4,5 %	0 ± 8	0,02 ± 0,74	34/35/31
DT (m.min ⁻¹)	74,3 ± 7,5	68,4 ± 7	-7 ± 2	-0,76 ± 0,25	0/0/100
DHV (m.min ⁻¹)	12,0 ± 5,9	9,3 ± 4,3	-23 ± 10	-0,55 ± 0,25	0/1/99
DTHV (m.min ⁻¹)	0,6 ± 0,7	0,5 ± 0,7	-8 ± 31	-0,07 ± 0,25	4/77/19
Accélérations (n.min ⁻¹)	0,5 ± 0,2	0,4 ± 0,1	-23 ± 8	-0,71 ± 0,25	0/0/100
Contact (n.min ⁻¹)	0,4 ± 0,2	0,4 ± 0,2	-1 ± 13	-0,02 ± 0,25	8/80/12
			U20 vs U18		
AVANTS	U18	U20	%Diff 90%IC	TE ± 90%IC	%Chance
DT (m.min ⁻¹)	71,6 ± 5,6	65,4 ± 4,7	-9 ± 2	-1,21 ± 0,32	0/0/100
DHV (m.min ⁻¹)	9,3 ± 4,4	6,6 ± 2,6	-29 ± 12	-0,80 ± 0,32	0/0/100
DTHV (m.min ⁻¹)	0,3 ± 0,4	0,2 ± 0,3	-41 ± 43	-0,30 ± 0,32	1/30/69
Accélérations (n.min ⁻¹)	0,4 ± 0,2	0,3 ± 0,1	-23 ± 11	-0,62 ± 0,32	0/2/98
Contact (n.min ⁻¹)	0,6 ± 0,2	0,6 ± 0,1	0 ± 8	-0,01 ± 0,32	15/67/18
			U20 vs U18		
ARRIÈRES	U18	U20	%Diff 90%IC	TE ± 90%IC	%Chance
DT (m.min ⁻¹)	78,6 ± 8,3	74,0 ± 6,8	-6 ± 4	-0,62 ± 0,40	0/5/95
DHV (m.min ⁻¹)	16,3 ± 5,3	13,4 ± 2,8	-18 ± 10	-0,73 ± 0,40	0/3/97
DTHV (m.min ⁻¹)	1,1 ± 0,9	1,1 ± 0,8	2 ± 30	0,03 ± 0,40	25/57/18
Accélérations (n.min ⁻¹)	0,6 ± 0,1	0,4 ± 0,1	-24 ± 8	-1,12 ± 0,40	0/0/100
Contact (n.min ⁻¹)	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,1	1 ± 18	0,03 ± 0,40	26/56/18

(Moyenne ± ET). Abréviations : DT, distance totale ; DHV, distance haute vitesse ; DTHV, distance très haute vitesse, TE, taille de l'effet ; IC, intervalle de confiance.

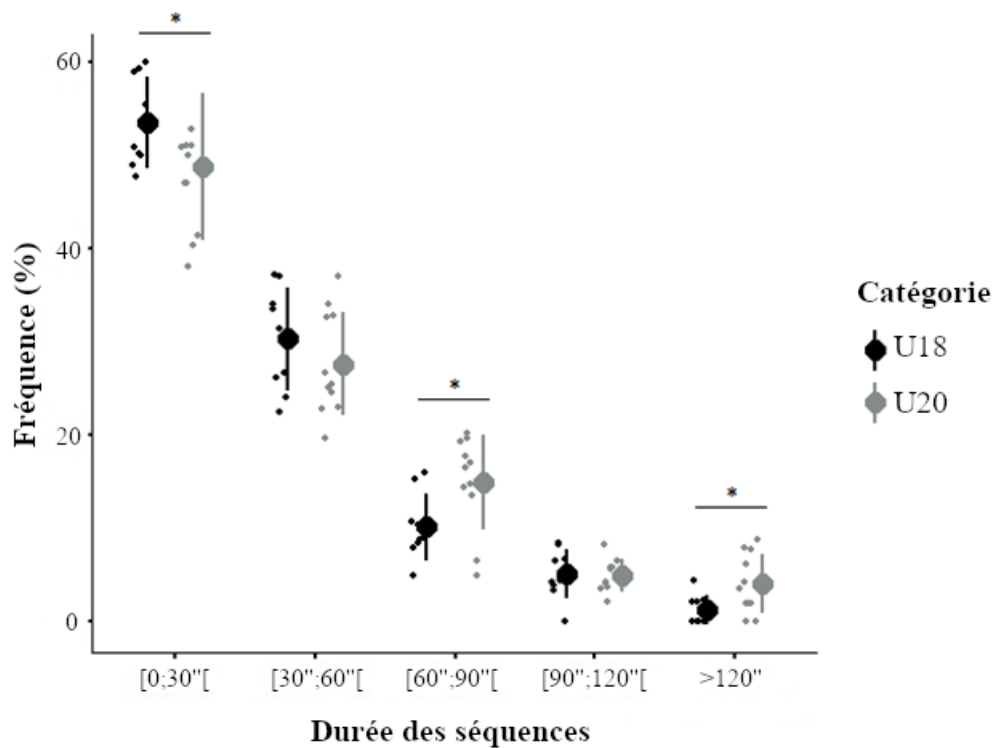


Figure 5.1 : Comparaison de la distribution de fréquence des séquences de TJE entre les matches des U18 et des U20. (* : différence probable).

Les Tableaux 5.4, 5.5 et 5.6 rapportent les données de course et de contact pendant les différentes tranches de temps des séquences de TJE dans les matches U18 et U20 ([30 s;60 s[, [60 s;90 s[et d'une durée >90 s, respectivement). En raison de la faible fréquence des séquences de >120 s, celles-ci ont été regroupées avec les séquences de [90 s;120 s[, nous porterons l'attention sur la description de ces séquences. Collectivement, les joueurs U18 ont effectué plus de DT et de DHV que leurs homologues U20 pendant ces séquences. Les arrières des U18 ont effectué plus d'accélération que les U20, tandis que les arrières des U20 ont couvert plus de DTHV que les arrières des U18. Les attaquants U20 ont effectué plus d'actions de contact que les pairs U18. Les résultats de toutes les autres variables de performance pendant les séquences >90 s présentaient des différences insignifiantes ou peu claires.

Tableau 5.4 : Comparaison de l'activité de course et de contact par minute pendant les séquences de TJE comprises entre 30 s et 60 s entre les joueurs U18 et les U20 pour l'ensemble de l'équipe et pour les postes d'avants et d'arrières.

TOUS LES JOUEURS	U18	U20	U20 vs U18		
			%Diff 90%IC	TE ± 90%IC	%Chance
Durée (min)	0,7 ± 0,1	0,7 ± 0,1	2 ± 1	0,08 ± 0,06	0/100/0
DT (m.min ⁻¹)	115,0 ± 36,1	101,5 ± 36,5	-12 ± 2	-0,37 ± 0,06	0/0/100
DHV (m.min ⁻¹)	31,4 ± 32,4	21,6 ± 27	-31 ± 6	-0,33 ± 0,06	0/0/100
DTHV (m.min ⁻¹)	1,9 ± 8,4	1,1 ± 5,6	-42 ± 22	-0,11 ± 0,06	0/99/1
Accélérations (n.min ⁻¹)	1,0 ± 1,2	0,9 ± 1,1	-12 ± 6	-0,11 ± 0,06	0/99/1
Contact (n.min ⁻¹)	0,6 ± 1	0,8 ± 1	36 ± 10	0,22 ± 0,06	70/30/0
U20 vs U18					
AVANTS	U18	U20	%Diff 90%IC	TE ± 90%IC	%Chance
DT (m.min ⁻¹)	112,2 ± 32,4	98,7 ± 32,8	-12 ± 2	-0,41 ± 0,08	0/0/100
DHV (m.min ⁻¹)	24,7 ± 27,4	15,4 ± 21,6	-38 ± 8	-0,38 ± 0,08	0/0/100
DTHV (m.min ⁻¹)	0,6 ± 4,4	0,2 ± 2,2	-67 ± 46	-0,12 ± 0,08	0/95/5
Accélérations (n.min ⁻¹)	0,9 ± 1,1	0,8 ± 1	-14 ± 9	-0,11 ± 0,08	0/96/4
Contact (n.min ⁻¹)	0,8 ± 1,1	1,2 ± 1,1	45 ± 11	0,32 ± 0,08	99/1/0
U20 vs U18					
ARRIÈRES	U18	U20	%Diff 90%IC	TE ± 90%IC	%Chance
DT (m.min ⁻¹)	119,0 ± 40,5	104,8 ± 40,2	-12 ± 3	-0,35 ± 0,09	0/0/100
DHV (m.min ⁻¹)	41,1 ± 36,3	29,0 ± 30,7	-30 ± 7	-0,37 ± 0,09	0/0/100
DTHV (m.min ⁻¹)	3,7 ± 11,7	2,1 ± 7,7	-43 ± 23	-0,17 ± 0,09	0/71/29
Accélérations (n.min ⁻¹)	1,2 ± 1,2	1,1 ± 1,2	-13 ± 9	-0,13 ± 0,09	0/88/12
Contact (n.min ⁻¹)	0,4 ± 0,7	0,5 ± 0,8	30 ± 19	0,15 ± 0,09	16/84/0

(Moyenne ± ET). Abréviations : DT, distance totale ; DHV, distance haute vitesse ; DTHV, distance très haute vitesse, TE, taille de l'effet ; IC, intervalle de confiance.

Tableau 5.5 : Comparaison de l'activité de course et de contact par minute pendant les séquences de TJE comprises entre 60 s et 90 s entre les joueurs U18 et les U20 pour l'ensemble de l'équipe et pour les postes d'avants et d'arrières.

TOUS LES JOUEURS	U18	U20	U20 vs U18		
			%Diff 90%IC	TE ± 90%IC	%Chance
Durée (min)	1,2 ± 0,1	1,2 ± 0,1	-2 ± 1	-0,16 ± 0,09	0/75/25
DT (m.min ⁻¹)	107,6 ± 31,4	101,7 ± 31,6	-5 ± 3	-0,18 ± 0,09	0/60/40
DHV (m.min ⁻¹)	23,4 ± 21,7	21,0 ± 21,0	-11 ± 9	-0,12 ± 0,09	0/93/7
DTHV (m.min ⁻¹)	0,9 ± 3,6	0,9 ± 3,8	-7 ± 38	-0,02 ± 0,09	0/100/0
Accélérations (n.min ⁻¹)	0,9 ± 0,9	0,8 ± 0,8	-15 ± 9	-0,16 ± 0,09	0/72/28
Contact (n.min ⁻¹)	0,8 ± 0,9	1 ± 0,9	21 ± 10	0,19 ± 0,09	43/57/0
U20 vs U18					
AVANTS	U18	U20	%Diff 90%IC	TE ± 90%IC	%Chance
DT (m.min ⁻¹)	105,5 ± 28,3	98,9 ± 26,4	-6 ± 3	-0,25 ± 0,12	0/27/73
DHV (m.min ⁻¹)	18,3 ± 17,2	14,8 ± 15,2	-19 ± 11	-0,22 ± 0,12	0/40/60
DTHV (m.min ⁻¹)	0,4 ± 2,1	0,2 ± 1,9	-40 ± 69	-0,07 ± 0,12	0/95/5
Accélérations (n.min ⁻¹)	0,9 ± 0,9	0,7 ± 0,8	-20 ± 12	-0,21 ± 0,12	0/45/55
Contact (n.min ⁻¹)	1,1 ± 0,9	1,4 ± 0,9	27 ± 11	0,32 ± 0,12	94/6/0
U20 vs U18					
ARRIÈRES	U18	U20	%Diff 90%IC	TE ± 90%IC	%Chance
DT (m.min ⁻¹)	110,4 ± 35,1	105,3 ± 36,7	-5 ± 5	-0,14 ± 0,14	0/75/25
DHV (m.min ⁻¹)	30,8 ± 25,1	28,6 ± 24,4	-7 ± 12	-0,09 ± 0,14	0/90/10
DTHV (m.min ⁻¹)	1,7 ± 5	1,6 ± 5,1	-4 ± 43	-0,01 ± 0,14	1/98/2
Accélérations (n.min ⁻¹)	1,0 ± 0,9	0,9 ± 0,9	-11 ± 13	-0,13 ± 0,14	0/80/20
Contact (n.min ⁻¹)	0,5 ± 0,7	0,5 ± 0,6	13 ± 19	0,10 ± 0,14	14/86/0

(Moyenne ± ET). Abréviations : DT, distance totale ; DHV, distance haute vitesse ; DTHV, distance très haute vitesse, TE, taille de l'effet ; IC, intervalle de confiance.

Tableau 5.6 : Comparaison de l'activité de course et de contact par minute pendant les séquences de TJE de >90 s entre les joueurs U18 et les U20 pour l'ensemble de l'équipe et pour les postes d'avants et d'arrières.

TOUS LES JOUEURS	U18	U20	U20 vs U18		
			%Diff 90%IC	TE ± 90%IC	%Chance
Durée (min)	1,8 ± 0,2	2,1 ± 0,5	14 ± 3	0,63 ± 0,13	100/0/0
DT (m.min ⁻¹)	110,8 ± 30,7	99,4 ± 25,5	-10 ± 3	-0,42 ± 0,13	0/0/100
DHV (m.min ⁻¹)	24,1 ± 20,0	17,9 ± 17,5	-25 ± 10	-0,33 ± 0,13	0/5/95
DTHV (m.min ⁻¹)	0,4 ± 2,0	0,8 ± 3,8	105 ± 104	0,13 ± 0,13	12/88/0
Accélérations (n.min ⁻¹)	0,9 ± 0,7	0,7 ± 0,6	-16 ± 10	-0,20 ± 0,13	0/48/52
Contact (n.min ⁻¹)	0,9 ± 0,7	1,0 ± 0,8	15 ± 10	0,18 ± 0,13	38/62/0
U20 vs U18					
AVANTS	U18	U20	%Diff 90%IC	TE ± 90%IC	%Chance
DT (m.min ⁻¹)	107,8 ± 26,2	96,0 ± 22,0	-11 ± 4	-0,50 ± 0,17	0/0/100
DHV (m.min ⁻¹)	17,8 ± 14,3	10,7 ± 12,0	-40 ± 12	-0,55 ± 0,17	0/0/100
DTHV (m.min ⁻¹)	0,4 ± 2,2	0,1 ± 1,2	-73 ± 64	-0,19 ± 0,16	0/54/46
Accélérations (n.min ⁻¹)	0,8 ± 0,7	0,7 ± 0,6	-9 ± 14	-0,10 ± 0,17	0/83/17
Contact (n.min ⁻¹)	1,2 ± 0,7	1,4 ± 0,7	22 ± 10	0,35 ± 0,17	94/6/0
U20 vs U18					
ARRIÈRES	U18	U20	%Diff 90%IC	TE ± 90%IC	%Chance
DT (m.min ⁻¹)	115,2 ± 35,9	103,4 ± 28,6	-10 ± 5	-0,38 ± 0,19	0/8/92
DHV (m.min ⁻¹)	33,2 ± 23,3	26,3 ± 19,2	-21 ± 12	-0,33 ± 0,19	0/14/86
DTHV (m.min ⁻¹)	0,4 ± 1,8	1,6 ± 5,3	316 ± 222	0,27 ± 0,19	81/19/0
Accélérations (n.min ⁻¹)	1,0 ± 0,7	0,8 ± 0,7	-24 ± 12	-0,38 ± 0,19	0/7/93
Contact (n.min ⁻¹)	0,6 ± 0,6	0,6 ± 0,5	11 ± 18	0,12 ± 0,19	25/75/0

(Moyenne ± ET). Abréviations : DT, distance totale ; DHV, distance haute vitesse ; DTHV, distance très haute vitesse, TE, taille de l'effet ; IC, intervalle de confiance.

3) Analyse des séquences pic d'activité.

Aucune différence n'a été observée entre les deux groupes d'âge en ce qui concerne l'activité de déplacement pendant l'une ou l'autre des courtes périodes de pic d'activité pour l'ensemble des joueurs (Figure 5.2). Les avants U18 ont probablement couvert une plus grande distance totale (petite TE) que les avants U20 dans les périodes pic d'activité de 4, 6, 10, 12 et 15 minutes. En ce qui concerne les arrières, des différences peu claires ont été observées entre les groupes d'âge pendant les maximales de déplacement.

Les avants U20 ont probablement effectué plus d'actions de contact (petite TE) que les avants U18 pendant les périodes avec l'activité maximale de contact de 30 s, 1, 2, 4, 5 et 12 min (Figure 5.3), alors qu'aucune différence n'a été observée entre les arrières U18 et U20.

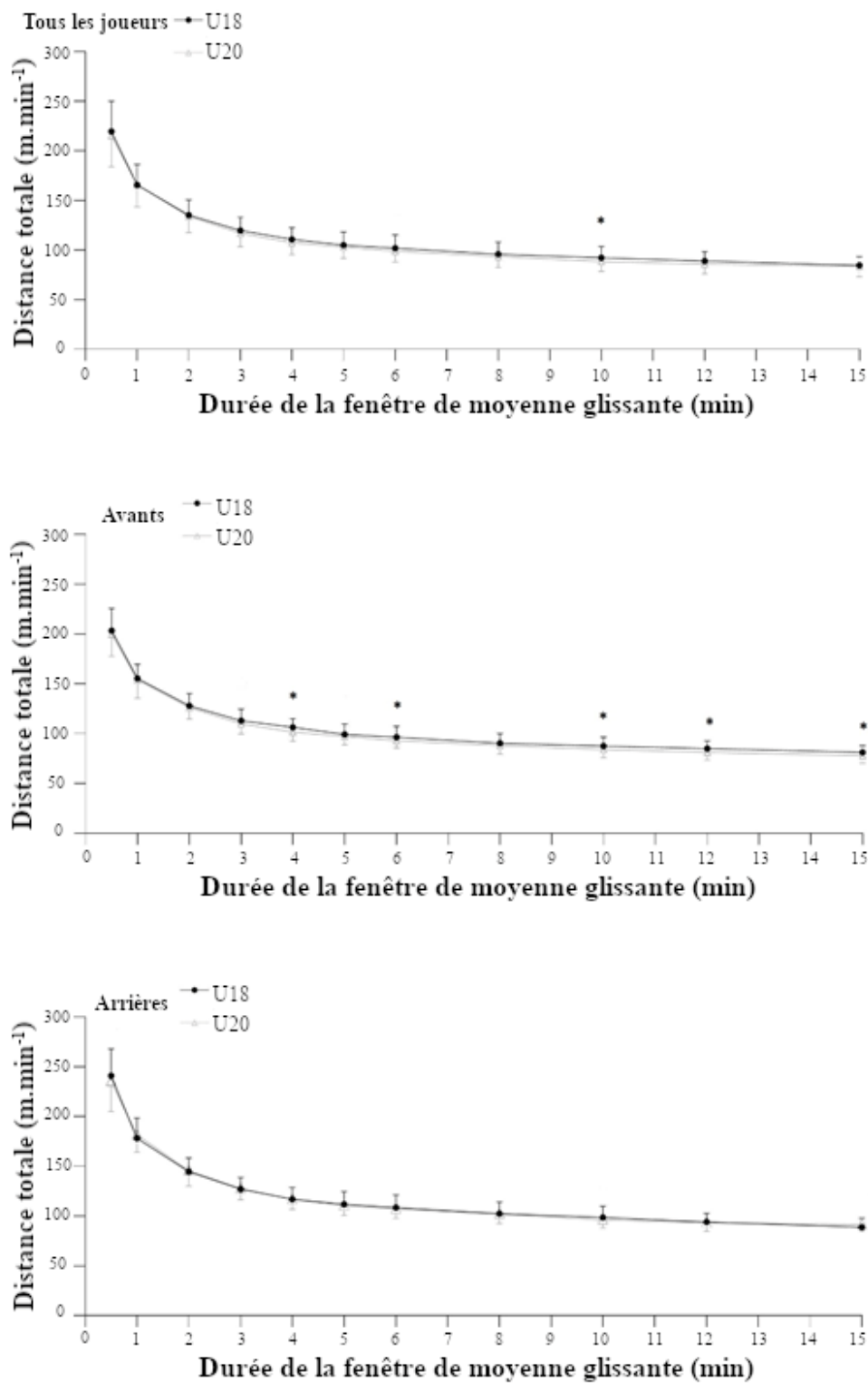


Figure 5.2 : Comparaison de l'activité de déplacement associée aux séquences pics de DT entre les avants et entre les arrières aux niveaux U18 et U20. * : Différence probable.

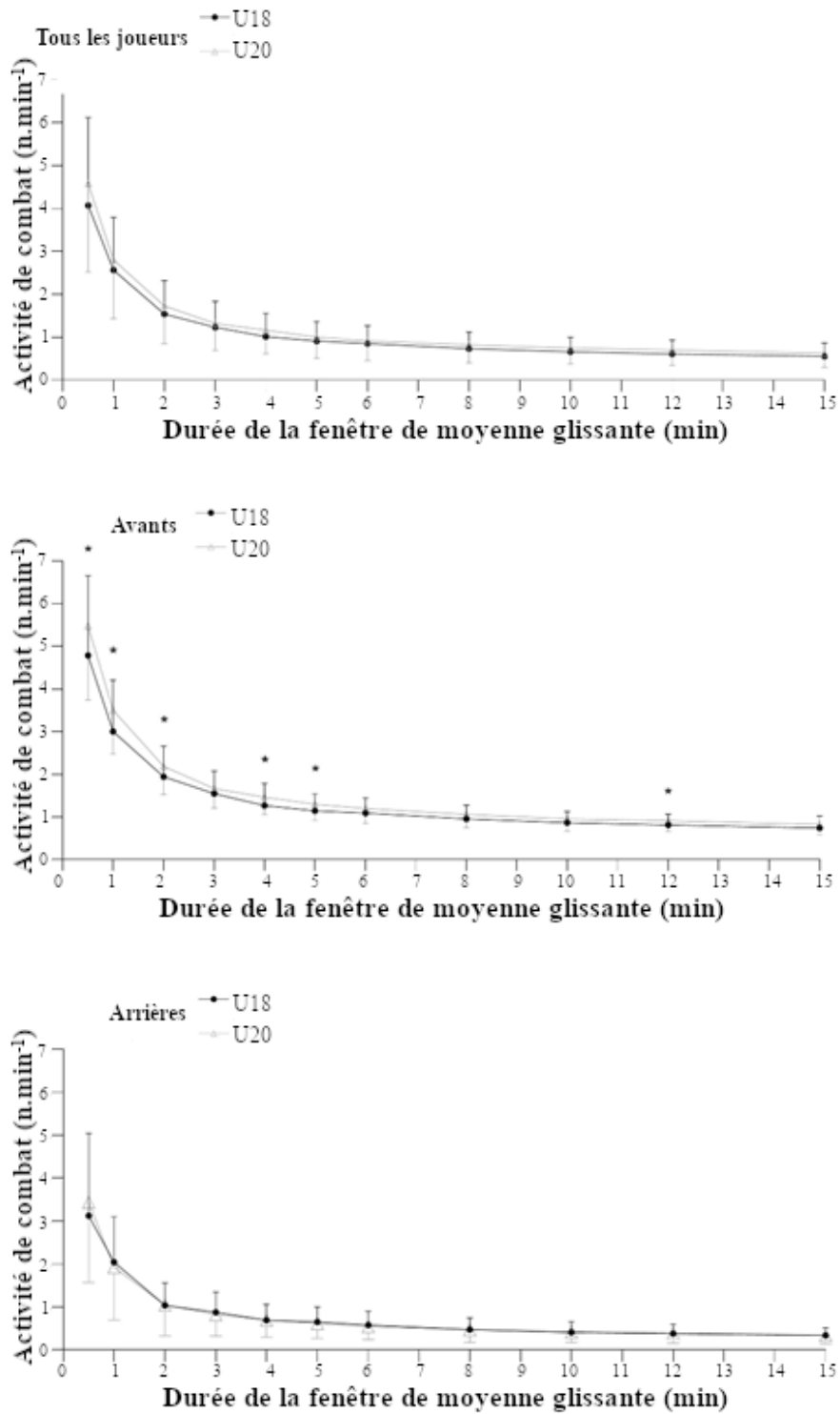


Figure 5.3 : Comparaison du nombre de contacts associés aux séquences pics de contact entre les avants et entre les arrières aux niveaux U18 et U20. * : Différence probable.

5.4. DISCUSSION

L'objectif de cette étude était de caractériser et de comparer les activités de course et de contact dans les compétitions internationales U18 et U20 de rugby à XV. Les principales conclusions sont les suivantes : (1) les joueurs U18 couvrent plus de DT, DHV et effectuent plus d'accélération par minute par rapport à leurs homologues U20, (2) une plus grande fréquence de séquences de temps de jeu effectif (TJE) de longue durée (>90 s) a été observée dans les matchs U20 par rapport aux matchs U18, alors que les U18 couvrent légèrement plus de DT et DHV par minute pendant ces séquences >90 s et, (3) alors qu'il n'y a pas de différences claires entre les catégories d'âge dans la performance de course pendant les courtes séquences pics d'activité, une plus grande fréquence de contacts a été observée chez les avants U20.

Analyse de l'activité moyenne du match

À notre connaissance, cette étude est la première à rapporter les caractéristiques de déplacement et de contact chez des joueurs U18 en compétition internationale standard et à les comparer avec les données recueillies chez des internationaux U20. Les données de l'activité de déplacement observées dans les deux catégories d'âge (Tableau 5.3) se situaient dans la fourchette supérieure de celles rapportées dans de précédentes recherches au niveau élite ; les DT parcourues par minute variaient de 65 et 74 m.min⁻¹ pour les actuels avants et arrières U20 respectivement vs 62 et 69 m.min⁻¹ observés chez d'autres joueurs internationaux U20 (Cunningham et al. 2016b). Au niveau des académies U18, des clubs de l'élite (Read et al. 2018a), des valeurs de DT par minute de 71 et 74 m.min⁻¹ ont été rapportées pour les avants et les arrières respectivement, contre 72 et 79 m.min⁻¹ dans la présente étude.

La DT, la DHV et la fréquence des accélérations étaient plus importantes chez les joueurs U18 par rapport aux joueurs U20. De plus, la DTHV était probablement plus importante pour les

avants U18 par rapport aux avants U20 alors qu'une différence peu claire a été observée entre les arrières. Ces résultats tendent à confirmer les tendances précédemment rapportées à travers les groupes d'âge dans d'autres populations de rugby à XV d'élite et de sous-élite (Cunningham et al. 2016b, Read et al. 2017a, Read et al. 2017b, Phibbs et al. 2018a). Till et al. (2020) ont signalé des distances relatives plus élevées parcourues par les joueurs U16 d'un niveau régional par rapport aux joueurs internationaux U20. De plus, la DHV et la fréquence des actions d'accélération sont plus importantes dans les matchs des U18 par rapport aux U20 (Cunningham et al. 2016b, Read et al. 2017a, Read et al. 2017b). Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que l'activité de course en soi n'est pas un critère de performance limitant dans le rugby à XV d'élite et international, quel que soit le poste, lors de la progression dans les différentes catégories d'âge. En raison des DT comparables couverts ici et des données précédemment rapportées dans une étude comparant des joueurs internationaux U20 et séniors (Cunningham et al. 2016b), les résultats actuels soutiennent également l'idée que la compétition internationale U20 est un "tremplin" adéquat pour préparer physiquement les joueurs aux exigences globales de déplacement par rapport au niveau international sénior.

Contrairement à l'activité de déplacement, aucune différence concernant la fréquence des actions de contact n'a été observée dans les groupes d'âge, que ce soit collectivement ou par poste. Ce résultat diffère de ceux obtenus précédemment lors de matchs d'académies de clubs professionnels anglais, où une plus grande fréquence de collisions a été observée chez les joueurs U16 par rapport aux U20 (Read et al. 2017b). Cette divergence entre les résultats pourrait potentiellement être liée au plan de performance national de développement tactique et technique des jeunes joueurs de la Fédération Française de Rugby, où un plan d'entraînement similaire et cohérent est mis en œuvre dans toutes les catégories d'âge. Des recherches similaires sont néanmoins justifiées dans d'autres populations internationales pour vérifier si ces exigences de contact reflètent celles observées au niveau sénior. De plus, nous pouvons supposer que

lorsque la masse corporelle augmente avec l'âge, l'intensité des contacts augmente, bien que des recherches soient nécessaires pour confirmer cette suggestion.

Séquences de temps de jeu effectif

À notre connaissance, cette étude est également la première à quantifier la fréquence d'occurrence des séquences de jeu TJE et les paramètres physiques de déplacement et de contact associés chez les joueurs internationaux U18 et U20 de rugby à XV. Des résultats similaires à ceux de Read et al. (2018b) ont montré que dans les compétitions U18, plus de la moitié des séquences de TJE observées étaient d'une durée <30 s. En revanche, les U20 ont réalisé un nombre modérément plus élevé de séquences plus longues (60-90 et >120 s). Bien que des recherches complémentaires utilisant des analyses techniques notationnelles (quantité et efficacité des actions rugby) soient nécessaires, une explication raisonnable de cette différence pourrait être liée à une plus grande capacité technique et tactique des joueurs U20, leur permettant de conserver collectivement la possession du ballon sur de plus longues périodes (Read et al. 2017b).

En ce qui concerne les caractéristiques physiques concomitantes observées lors des séquences de jeu d'une durée >90 s (Tableau 5.6), les U18 ont couvert presque certainement plus de DT et probablement plus de DHV par rapport aux U20. Il convient également de noter que la DT couverte par les U18 de la présente étude était supérieure aux valeurs observées lors de séquences de jeu de matchs internationaux séniors pendant des séquences de même durée (Pollard et al. 2018). Ces résultats tendent une fois de plus à impliquer que l'activité de course en soi n'est pas un facteur discriminant lors de la progression dans les catégories d'âge internationales U18 et U20 et que les exigences des matchs aux niveaux plus jeunes offrent des opportunités adéquates pour préparer les joueurs au rugby international sénior.

Les U18 dans l'ensemble ont effectué plus de DT et de DHV, relativisées au temps de jeu, pendant les séquences de jeu plus longues. La fréquence des évènements de contact pendant ces longues séquences était environ 20% plus élevée (petite TE) chez les avants U20 par rapport aux U18, tandis que les arrières U20 couvraient plus de DTHV (petite TE) par rapport aux U18. Ces résultats suggèrent qu'au niveau U20, l'accent pourrait être mis sur le développement d'aptitudes physiques spécifiques au poste, par le biais de programmes de conditionnement physique adaptés, afin de répondre aux exigences de haute intensité des séquences de jeu plus longues qui se produisent fréquemment dans cette catégorie d'âge.

Périodes pic d'activité

L'analyse collective de l'activité pic de déplacement (distance parcourue par minute) n'a révélé aucune différence entre les deux groupes d'âge quelle que soit la durée de la fenêtre d'analyse (Figure 5.2). Les exigences observées pendant une fenêtre d'activité de course maximale de 2 minutes ont montré que la performance des avants de la présente étude n'était pas différente de celle précédemment rapportée chez les avants du plus haut niveau domestique U18 anglais (Read et al. 2019). En effet, sur la fenêtre de 2 minutes, les avants anglais ont parcouru des distances allant de 121 à 132 m.min⁻¹, contre 128 et 126 m.min⁻¹ chez les avants U18 et U20 actuels respectivement. En revanche, dans la même étude, les arrières U18 anglais avaient tendance à parcourir des distances plus faibles que les arrières U18 internationaux actuels pendant une période pic de 2 minutes (entre 133 et 146 m.min⁻¹ contre 144 et 145 m.min⁻¹ pour les arrières U18 et U20 actuels, respectivement). Par rapport aux données chez des séniors internationaux, les résultats actuels dans les deux groupes de postes et pour les deux catégories d'âge étaient comparables pour des courtes périodes de pic allant de 1 min à 5 min (Delaney et al. 2017b, Cunningham et al. 2018a). Pendant les périodes pic plus longues (>10-min), les jeunes joueurs actuels ont parcouru des distances relatives plus importantes que les joueurs

internationaux séniors (Delaney et al. 2017b). En résumé, l'activité de déplacement lors des séquences pics dans les matchs U18 et U20 internationaux était un peu plus élevée que chez les joueurs de clubs, mais tendait à être stable entre les catégories d'âge. Les performances étaient également comparables à celles observées chez les joueurs séniors internationaux, ce qui suggère que les jeunes joueurs internationaux seraient capables de répondre physiquement aux plus importantes exigences de déplacement du plus haut niveau.

Les données de déplacement lors des séquences pics rapportées ci-dessus peuvent être utilisées pour concevoir des prescriptions d'entraînement basées sur les scénarios les plus défavorables (« worst case scenario ») pendant les séances de préparation physique (Cunningham et al. 2018a). De même, l'activité de contact pendant les périodes pics d'activité fournit également aux praticiens des informations sur la charge de contact pour les prescriptions à l'entraînement (Figure 5.3). Bien que collectivement aucune différence n'ait été observée entre les catégories U18 et U20, les avants U20 ont effectué probablement plus d'actions de contact que les U18 pendant les courtes périodes pics, d'une durée inférieure à 4 min (TE entre 0,36 et 0,46). Ces résultats suggèrent que lorsque les U18 passent au niveau U20, il est nécessaire d'adapter la dose de contact à l'entraînement pour améliorer leur capacité à répéter les événements contact.

5.4.1. Limites

Dans l'étude actuelle, seule la fréquence des événements contact a été quantifiée, et des recherches futures sont justifiées pour déterminer l'intensité de ces événements (quantifiée en G) notamment en utilisant les technologies d'accéléromètre et de gyroscope logées dans le GPS ou dans des protège-dents instrumentés (Jones et al. 2022). Cela permettrait une évaluation plus précise des exigences de contact entre les deux groupes d'âge, car on pourrait s'attendre à ce que l'intensité du contact soit plus importante dans les compétitions U20 en raison de la masse

corporelle plus importante des joueurs U20 (Lombard et al. 2015, Darrall-Jones et al. 2016b). Des recherches supplémentaires sur l'analyse des matchs sont nécessaires pour déterminer les exigences tactiques et techniques concomitantes, collectives et spécifiques à chaque poste, de l'analyse globale à l'analyse des séquences pics, afin de fournir une compréhension plus holistique de la performance en match. Il est également possible que les directives nationales en matière de style de jeu propres au programme de développement des équipes de France jeunes aient biaisé les présents résultats. Par conséquent, des études supplémentaires utilisant idéalement des échantillons de plus grande taille (matchs et joueurs) et des données recueillies auprès de populations d'autres nations sont nécessaires (Ramírez-López et al. 2020a).

5.4.2. Conclusion

À notre connaissance, cette étude est la première à caractériser et à comparer les activités de déplacement et de contact dans les matchs internationaux de rugby U18 et U20. Il semble que les exigences observées au niveau U18 suffisent à préparer physiquement les joueurs au niveau U20, tandis que les exigences de ce dernier sont comparables à celles rapportées précédemment dans les matchs internationaux séniors. Les travaux futurs devraient se concentrer sur la détermination des aspects techniques et/ou tactiques concomitants du jeu afin de fournir une compréhension plus holistique des exigences de performance en match au niveau jeune. Aussi, pour compléter la connaissance de l'environnement compétitif international des jeunes joueurs au-delà des performances, nous avons souhaité décrire les réponses individuelles au match sur différents marqueurs d'état de forme (neuromusculaires, biologiques ou la perception de la fatigue). Nous avons ensuite voulu comprendre l'impact qu'avait la charge de travail du match, décrite dans la présente étude, sur les marqueurs d'état de forme

5.5. APPLICATIONS PRATIQUES

- L'activité observée lors des matchs internationaux des moins de 18 ans suggère que les joueurs de cette tranche d'âge sont suffisamment bien préparés physiquement pour les exigences de déplacement et de contact sur l'ensemble du match et lors des séquences de temps de jeu effectif observées au niveau des moins de 20 ans.

- Les informations actuelles sur les intensités maximales de course peuvent servir de base aux prescriptions apportées lors de séances d'entraînement à haute intensité et plus particulièrement dans les séquences de jeux à effectif réduit.

- Ces résultats peuvent également aider les praticiens à gérer et à individualiser les charges de contact entre les catégories d'âge et les groupes de poste pendant les exercices d'entraînement de haute intensité.

ÉTUDE 3 :

Quel effet d'un match de rugby international sur les marqueurs
de l'état de forme des jeunes joueurs U18 et U20 ?

6.1. INTRODUCTION

Comme nous avons pu le décrire précédemment (Étude 2), le rugby est un sport intermittent de contacts, impliquant de nombreuses actions de haute intensité comme les sprints, les placages, les rucks ou les mêlées, entrecoupées de phases à plus faible intensité (en position arrêtée, en marche ou en jogging) (Cahill et al. 2013, Peeters et al. 2022). A la différence des études ayant évolué la performance physique des joueurs, en analysant des données de déplacement relativisées au temps de jeu pour avoir une activité comparable à temps de jeu différents (Read et al. 2017b, Read et al. 2018a, Peeters et al. 2022), pour la présente étude, il semble plus pertinent de s'intéresser à l'activité globale du match comme ont pu le faire Read et al. (2017a). Les auteurs ont évalué que les distances totales, et à différentes allures, parcourues de joueurs universitaires, ainsi que l'activité combattue (mesurée par le GPS comme une charge globale) étaient supérieures à celles de joueurs U18 d'académie de clubs professionnels, notamment chez les arrières. En lien avec cette charge externe subit, il a été observé que suite à un match de rugby, l'état physique et physiologique du joueur, ainsi que la perception qu'il a de son propre état, sont altérés (Takarada 2003, Jones et al. 2014, West et al. 2014). De plus, Enoka and Duchateau (2016) ont décrit le phénomène de la fatigue comme "des réductions des fonctions physiques et cognitives qui vont d'une altération de la performance motrice induite par l'exercice à des sensations de fatigue et de faiblesse qui accompagnent certains états cliniques".

Les perturbations décrites sont de source multifactorielle par la nature du rugby, elles peuvent prendre une origine dans les efforts les plus intenses de course (les sprints, les accélérations) ou de combat (Jones et al. 2014). L'état transitoire dans lequel peut se retrouver le joueur après un match peut être évalué dans des situations écologiques sur le terrain et pour les différentes composantes, qu'elles soient physiques en évaluant la fonction neuromusculaire, biologique en mesurant le niveau de dégradation musculaire ou cognitive en caractérisant la perception de

fatigue du joueur. Ainsi, la littérature a mis en évidence l'utilisation du Countermovement Jump (CMJ) pour l'évaluation de la fonction neuromusculaire (Cormack et al. 2008, McLean et al. 2010, McLellan et al. 2011b, Taylor et al. 2012, West et al. 2014). La principale mesure des dommages musculaires étudiée dans la littérature sur les sports de collision est la concentration en créatine kinase ([CK]) (Takarada 2003, Smart et al. 2008, McLellan et al. 2010, McLellan et al. 2011b, McLellan et al. 2011a, Johnston et al. 2015). Et pour finir, des mesures de la perception de la fatigue (par exemple les douleurs musculaires), au moyen de questionnaires, sont utilisées pour surveiller la récupération des athlètes de haut niveau (Main et al. 2010, Shearer et al. 2015).

Pour comprendre les variations d'état de forme des joueurs post-match, il convient de comprendre comment le match peut influencer l'état de forme. Or, l'évaluation de l'impact des variables de charge de travail, charge externe, sur les marqueurs de la fatigue n'a pas fait l'objet de beaucoup de recherche. Dans un sport de collisions comme le rugby, on peut aisément formuler l'hypothèse que le nombre de contacts pourrait être le principal contributeur de la fatigue (Johnston et al. 2014b). Ainsi, l'effet du contact sur l'état de forme a été décrit dans la littérature (Roe et al. 2017b). Les auteurs ont évalué qu'à la suite d'un entraînement avec contacts, les performances au CMJ, la [CK] et la perception de la fatigue par les jeunes joueurs étaient plus dégradées qu'un entraînement sans contacts. De plus, Smart et al. (2008) ont démontré des corrélations significatives entre la [CK] et le temps de jeu des joueurs ou encore le nombre d'actions de contacts comme la participation à des rucks ou des mêlées. Mais à notre connaissance, aucune étude n'a étudié l'effet de variables de charge externe lors d'un match (comme le temps de jeu, des variables de déplacement ou le contact) sur des joueurs internationaux U18 ou U20.

Quelques études se sont attachées à caractériser l'évolution des marqueurs de l'état de forme des jeunes joueurs à la suite d'un match (Roe et al. 2016c, Lacombe et al. 2018, Ramírez-López

et al. 2020b). Ainsi, on a pu évaluer qu'en moyenne chez des jeunes U18 d'académies de clubs professionnels, pour tous les marqueurs d'état de forme analysés (performances au CMJ, [CK], questionnaires d'état de forme), une dégradation était observée +24h post-match avant un retour à des valeurs pré-match à +72h (Roe et al. 2016c). Les auteurs relèvent une hétérogénéité des réponses, qui est entre autres expliquée par le volume de jeu auquel le joueur est exposé (Lacome et al. 2018). D'autres recherches ont évalué qu'à la suite de matchs U18 internationaux, les performances au CMJ et la perception de fatigue étaient altérées par le match lors d'une évaluation à +24h et les variations à +48h n'étaient significativement différentes qu'après un enchaînement de plusieurs matchs (Ramírez-López et al. 2020b). Ces auteurs ont notamment mis en avant ces variations au regard d'une perception de douleurs musculaires ressenties chez les avants jusqu'à +48h post-match, seulement +24h chez les arrières. Chez les U20 internationaux, un constat identique a été fait sur l'ensemble des tests lors d'un enchaînement de plusieurs matchs (Lacome et al. 2018). À notre connaissance, aucune étude n'a comparé l'état de forme des jeunes joueurs U18 et U20 à la suite de matchs internationaux, une information capitale quand on observe la facilité que les staffs ont de plus en plus à faire surclasser les meilleurs jeunes joueurs U18 pour joueur en U20.

L'objectif de la présente étude était donc de caractériser et comparer l'état de forme des jeunes joueurs internationaux U18 et U20 entre 36h et 40h suite au match, juste avant la reprise de l'entraînement. Le second objectif de l'étude a été d'évaluer l'impact de l'exigence physique du match, et donc des variables de la charge externe associée, sur l'état de forme des joueurs. Ainsi, cette étude s'inscrit dans une démarche écologique puisqu'elle utilise les données de la batterie de tests d'état de forme mise en place dans les équipes de France Jeunes au moment de la reprise de l'entraînement après un match, pour déterminer si les joueurs sont aptes à s'entraîner.

6.2. MÉTHODE

6.2.1. Approche expérimentale du problème

Afin de caractériser l'état de forme et de déterminer l'impact des variables de charge externe lors du match sur l'état de forme des jeunes joueurs U18 et U20, nous avons analysé 15 matchs et suivis par une batterie d'état de forme +36h à +40h post-match. La caractérisation de l'état de forme de ces jeunes internationaux a été réalisée en évaluant la fonction neuromusculaire, la concentration des marqueurs de dommages musculaires ainsi que la perception de la fatigue par le joueur. Ainsi, des tests de sauts verticaux (CMJ), un microprélèvement de sang ([CK]) et un questionnaire ont été réalisés auprès des joueurs. Aussi, l'activité de déplacement et le nombre de collisions ont été étudiés lors des 15 matchs internationaux à l'aide du GPS et d'un logiciel d'analyse vidéo (SportsCode) respectivement. Sept matchs ont concerné les jeunes joueurs U18, et huit matchs ont été analysés pour les U20. Pour des raisons liées à des contraintes de la compétition, certains tests de la batterie complète sont manquants, le Tableau 6.1 recense l'ensemble des observations par test.

6.2.2. Participants

Un total de 107 joueurs a participé à l'étude (U18, n=56 ; U20, n= 51), 45 joueurs ont été testés sur 1 match, 38 sur 2 matchs, 11 sur 3 matchs, 7 sur 4 matchs, 4 sur 5 matchs et 2 joueurs sur 6 matchs. Ils ont été répartis en groupe de poste avant (U18, n= 31 ; U20, n= 27) et arrière (U18, n= 25 ; U20, n= 24). Les joueurs étaient exclus de l'analyse s'ils avaient été blessés au cours du match, et s'ils avaient joué moins de 20 minutes (Roe et al. 2016c). Le Tableau 6.1 présente le nombre d'observations par test de la batterie d'état de forme en fonction de la catégorie d'âge et du poste des joueurs. Tous les tests ont été démontrés et expliqués aux joueurs, ils ont tous été familiarisés à la démarche.

Tableau 6.1 : Nombre d'observations par test de la batterie d'état de forme en fonction de la catégorie d'âge et du poste des joueurs.

CMJ				[CK]				Questionnaire			
173				271				236			
U18		U20		U18		U20		U18		U20	
59		114		131		140		127		109	
Av.	Ar.	Av.	Ar.	Av.	Ar.	Av.	Ar.	Av.	Ar.	Av.	Ar.
31	28	70	44	76	55	83	57	73	54	64	45

Abréviations : Av., avants ; Ar., arrières ; CMJ : countermovement jump ; [CK] : concentration en créatine kinase.

Toutes les données ont été collectées dans le cadre du protocole d'évaluation de l'état de forme des joueurs post-match mis en place dans les équipes de France Jeunes. Néanmoins, les participants ont donné leur consentement éclairé avant de commencer l'étude. Les parents ou un tuteur ont fourni un consentement écrit pour tous les joueurs âgés de moins de 18 ans. L'étude a été approuvée par la commission scientifique et de recherche de la FFR et les recommandations de la Déclaration d'Helsinki ont été respectées.

6.2.3. Procédures de collecte des données

Dans un souci de logique chronologique des événements, nous avons présenté d'abord la charge externe liée au match, puis l'état de forme des joueurs.

Évaluation de la charge externe

Mesure du déplacement

Les joueurs portaient un dispositif de suivi GPS portable (SensorEverywhere V3, Digital Simulation, France), échantillonnant à 16Hz. Le GPS était placé dans une poche personnalisée dans le maillot et situé entre les omoplates. Pour limiter la potentielle variabilité entre les unités, chaque joueur portait la même unité pendant toute la durée de chaque compétition. Trente minutes avant le début de chaque match, les unités GPS étaient allumées pour assurer une réception satellite claire. Les données ont été saisies et calculées à l'aide du logiciel SensorEverywhere Analyser (Digital Simulation, Paris, France). Des recherches récentes évaluant la fiabilité interunités des dispositifs GPS SensorEverywhere ont démontré une différence triviale pour l'erreur typique de mesure et une petite différence pour la vitesse maximale de sprint ($0,5 \pm 0,1\%$) et l'accélération maximale ($3,9 \pm 0,6\%$) respectivement (Lacome et al. 2019).

Trois zones arbitraires d'intensité de course ont été utilisées pour analyser les données de déplacement mesurées en mètres (m) (Peeters et al. 2022) : distance totale (DT), distance courue (vitesse $>4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) et distance sprintée (vitesse $>7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Pour compléter l'analyse de la charge de déplacement, toutes les accélérations supérieures à $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ont été comptabilisées.

Le temps de jeu en minutes des joueurs a également été reporté.

Mesure du contact

Un opérateur formé a codé les actions du match liées au contact, notamment les plaquages, les rucks, les collisions du porteur de balle, les mauls et les mêlées à l'aide d'un logiciel d'analyse vidéo (SportsCode Elite, version 10, Hudl, États-Unis). La participation active à une mêlée a

été considérée comme provenant de l'engagement de la première ligne jusqu'à ce qu'un joueur soit détaché après la libération du ballon (Roberts et al. 2008). Les 3èmes lignes ont été exclus du codage de la mêlée. La participation active aux phases de ruck et de maul a été codée à partir du moment où l'épaule du joueur entrait en contact avec le ruck ou le maul jusqu'à ce qu'il s'en détache (Lacome et al. 2014). Les plaquages sont considérés comme des actions où un joueur tente d'arrêter physiquement le porteur de balle alors qu'il est debout (Lacome et al. 2014). Les collisions ont été comptabilisées lorsqu'un contact physique a eu lieu entre un attaquant et un défenseur (Gabbett et al. 2011).

Évaluation de l'état de forme

La batterie de tests de l'état de forme des joueurs mis en place a permis de tester la fonction neuromusculaire, le niveau de dégradation musculaire et la perception du joueur de sa fatigue. L'évaluation de la fonction neuromusculaire a été réalisée au moyen d'un saut vertical, countermovement jump (CMJ). Le niveau de dégradation musculaire a été évalué en mesurant la concentration en créatine kinase ([CK]) dans le sang total. Et pour finir, la perception du joueur sur sa fatigue a été quantifiée au moyen d'un questionnaire de bien-être en 6 items. Toutes ces données ont été récoltées par le préparateur physique de l'équipe dans un délai compris entre +36h et +40h post-match, correspondant ainsi à des évaluations entre 7:00 et 8:30 les matins. Pour des raisons liées à des contraintes de la compétition, certains tests de la batterie complète sont manquants.

Évaluation de la fonction neuromusculaire

La performance neuromusculaire a été évaluée en utilisant la vitesse maximale concentrique mesurée lors d'un countermovement jump (CMJ) à l'aide d'un Gymaware (Kinetic Performance Technology, Canberra, Australie). Avant les tests, les participants ont effectué un échauffement

dynamique de 10 minutes consistant en une activation dynamique avec rouleau d'automassage, une mobilité active et une charge progressive à poids de corps des membres inférieurs avec des fentes, des squats, et des CMJ progressivement de plus en plus intenses. Pour évaluer les sauts, chaque participant devait effectuer 4 CMJ sans charge avec un bâton de bois placé sur les épaules. Chaque participant a effectué 4 répétitions, en marquant une pause de 3 à 5 secondes entre chaque saut (Mathieu et al. 2016). Une moyenne centrée (excluant les meilleures et les pires mesures) a été calculée et utilisée comme marqueur de la performance neuromusculaire (Lacome et al. 2018). Une reproductibilité jugée acceptable a été relevée par Roe et al. (2016a), avec un coefficient de variation (CV) $\leq 5\%$ pour la hauteur des sauts.

La concentration en Créatine Kinase ([CK])

La [CK] a été mesurée à l'aide d'environ 500 μL de sang total prélevé à partir de ponctions capillaires au bout du doigt et conservé dans un microtube contenant de l'héparine de lithium (BD Microtainer ; Becton Dickinson, Franklin Lakes, Etats Unis). Dans l'heure suivant le prélèvement sanguin, 32 μL ont été prélevés dans le tube à l'aide d'une pipette spécifique et placés sur une bande de mesure. Les analyses ont été réalisées à l'aide d'un Reflotron Sprint (Roche Diagnostics, Bâle, Suisse). La [CK] est exprimée en unité arbitraire (UA). Le Reflotron a été calibré selon les recommandations du fabricant. Des travaux antérieurs portant sur des mesures de [CK] effectuées dans des conditions similaires ont fait état d'un faible CV interjournalier de 10,6 % et d'un coefficient de corrélation intraclass très élevé (0,99) (Mathieu et al. 2016).

La perception de la fatigue

La perception de la fatigue des joueurs a été évaluée à l'aide d'un questionnaire de bien-être en 6 items. Le questionnaire évaluait la fatigue, la qualité du sommeil, les douleurs musculaires générales du haut et du bas du corps, le niveau de stress et l'humeur sur une échelle de 5 points

(scores de 1 à 5, par incréments de 0,5 point) (Hooper and Mackinnon 1995, Lacombe et al. 2018). Le bien-être général a été déterminé en additionnant les 6 scores individuels. De précédents travaux ont évalué une bonne fiabilité de cette mesure (CV = 7,1 %) (Roe et al. 2016a).

6.2.4. Analyse statistique

Les joueurs ont été classés par poste (avants et arrières) et par catégorie (U18 et U20). Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel JASP (Version 0.14, JASP Team, 2020, Université d'Amsterdam, Amsterdam, Pays-Bas), ainsi que du logiciel RStudio (Version 1.3.109). Le test de normalité de Shapiro Wilk a été réalisé pour vérifier la distribution de chaque variable incluse dans l'analyse. Une analyse de variance par modèle mixte à deux voies a été utilisée pour étudier les différences de charge externe et d'état de forme entre les catégories d'âge et le poste des joueurs. Dans l'analyse des ANOVA, lorsqu'une différence significative ($p < 0,05$) a été observée, des analyses post-hoc de Bonferroni ont été utilisées pour détecter les différences par paire. L'éta carré partiel (η^2) a été calculé à partir de l'ANOVA, afin d'obtenir l'ampleur de la différence. Les valeurs de 0,01, 0,06 et supérieures à 0,14 ont été considérées comme représentant des différences faibles, moyennes et importantes, respectivement (Cohen 2013).

Une fois la caractérisation des charges externes et de l'état de forme des joueurs après le match, des corrélations ont été mesurées entre les variables d'état de forme et les variables de charge externe. Les valeurs de r de Pearson, associées à leurs probabilités, ont été représentées dans une matrice de corrélation.

Pour finir, un modèle mixte linéaire a été réalisé pour chaque variable d'état de forme, incluant la catégorie, le poste, les variables de charge externe (durée, distance totale, distance courue,

distance sprintée, nombre d'accélération et de contacts). Cette analyse a été réalisée dans le logiciel RStudio (Version 1.3.109), au moyen du package lme4.

6.3. RÉSULTATS

Évaluation de la charge externe

Les résultats de l'ANOVA mesurant les différences entre les postes et les catégories pour chaque variable de charge externe sont représentés dans le Tableau 6.2. Les différentes variables de charge externe, en fonction du poste et de la catégorie, ont été représentées dans la Figure 6.1. Les résultats démontrent que les U20 ont un temps de jeu plus conséquent (17 ± 6 min, $p < 0,001$) que les U18, ils parcourent également une distance totale plus grande (893 ± 428 m, $p < 0,001$) et réalisent un nombre de contacts (-8 ± 4 contacts, $p < 0,001$) plus grand que les U18. L'analyse de la charge externe met en évidence un effet significatif du poste pour l'ensemble des variables ($p < 0,001$).

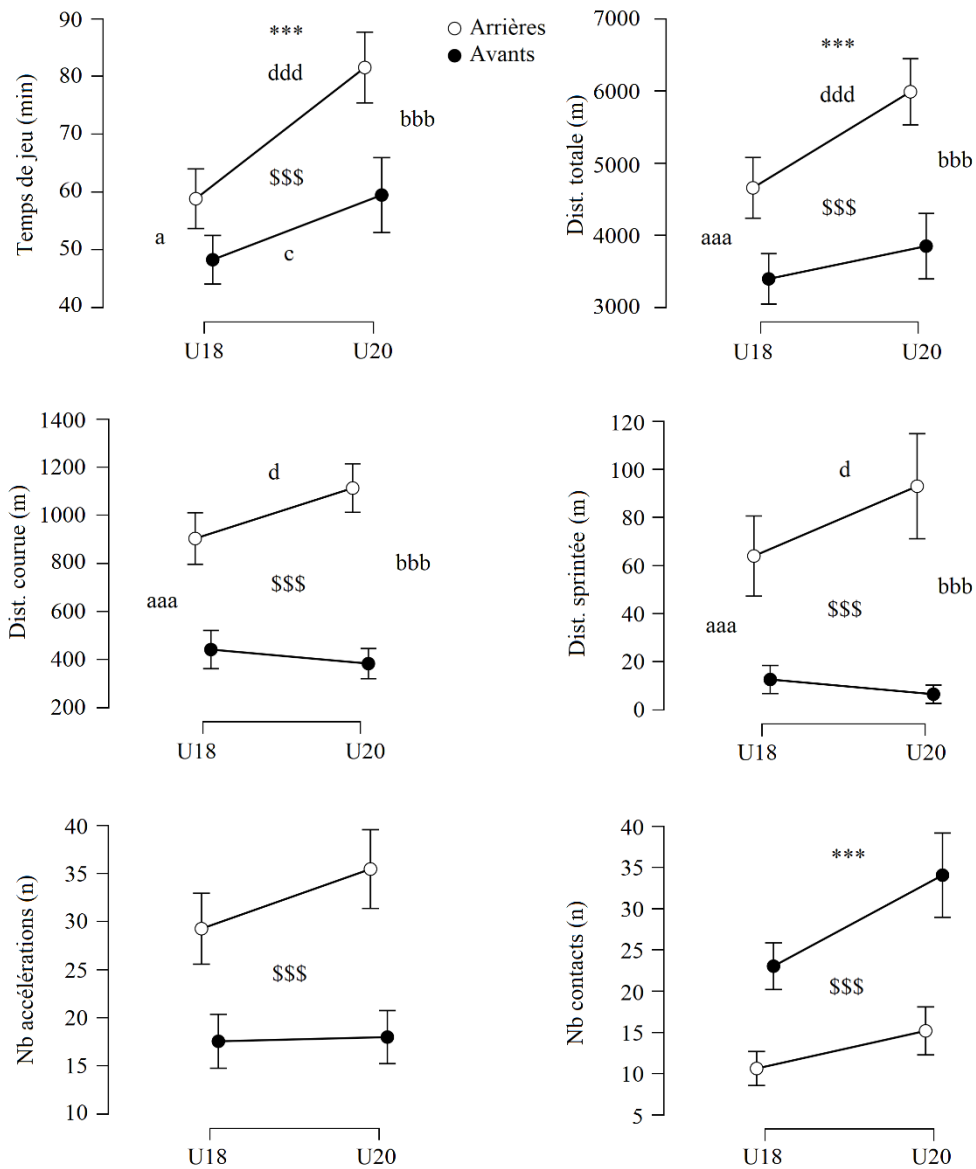


Figure 6.1 : Représentation des variables de charge externe mesurées lors de matchs internationaux U18 et U20 en fonction du poste.

* : différence significative entre les catégories, *: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$.

\$: différence entre les postes, \$: $p < 0,05$; \$\$: $p < 0,01$; \$\$\$: $p < 0,001$.

a : différence entre les avants et les arrières U18, a: $p < 0,05$; aa: $p < 0,01$; aaa: $p < 0,001$.

b : différence entre les avants et les arrières U20, b: $p < 0,05$; bb: $p < 0,01$; bbb: $p < 0,001$.

c : différence entre les avants U18 et U20, c: $p < 0,05$; cc: $p < 0,01$; ccc: $p < 0,001$.

d : différence entre les arrières U18 et U20, d: $p < 0,05$; dd: $p < 0,01$; ddd: $p < 0,001$.

Tableau 6.2 : Résultats du modèle mixte ANOVA mesurant les différences entre les postes et les catégories pour chaque variable de charge externe.

		F	p	η^2 p
Temps de jeu (min)	Catégorie	36,918	< ,001 ***	0,15
	Poste	34,187	< ,001 ***	0,14
	Catégorie * Poste	4,259	0,04 *	0,02
Distance totale (m)	Catégorie	16,898	< ,001 ***	0,074
	Poste	61,301	< ,001 ***	0,226
	Catégorie * Poste	4,085	0,045 *	0,019
Distance courue (m)	Catégorie	2,61	0,108	0,012
	Poste	161,764	< ,001 ***	0,435
	Catégorie * Poste	8,189	0,005 **	0,038
Distance sprintée (m)	Catégorie	3,515	0,062	0,016
	Poste	127,339	< ,001 ***	0,377
	Catégorie * Poste	8,283	0,004 **	0,038
Nb Accélération (n)	Catégorie	3,756	0,054	0,018
	Poste	72,536	< ,001 ***	0,257
	Catégorie * Poste	2,832	0,094	0,013
Nb Contacts (n)	Catégorie	19,197	< ,001 ***	0,084
	Poste	77,239	< ,001 ***	0,269
	Catégorie * Poste	3,303	0,071	0,015

*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$.

Évaluation de l'état de forme

La caractérisation de l'état de forme des joueurs est représentée dans la Figure 6.2. L'ANOVA met en évidence un effet significatif du poste pour l'évaluation au CMJ ($p < 0,001$), et un effet significatif de la catégorie pour l'analyse de la [CK] ($p < 0,01$) (Tableau 6.3). En effet, une différence significative a été observée avec une vitesse concentrique mesurée au CMJ plus grande chez les arrières que chez les avants ($0,19 \pm 0,10 \text{ m.s}^{-1}$, $p < 0,001$). Les U18 présentent une [CK] significativement plus faible que les U20 ($-149,91 \pm 110,53 \text{ UA}$, $p < 0,01$). Aucune différence n'a été observée pour l'analyse des réponses au questionnaire entre les U18 et les U20.

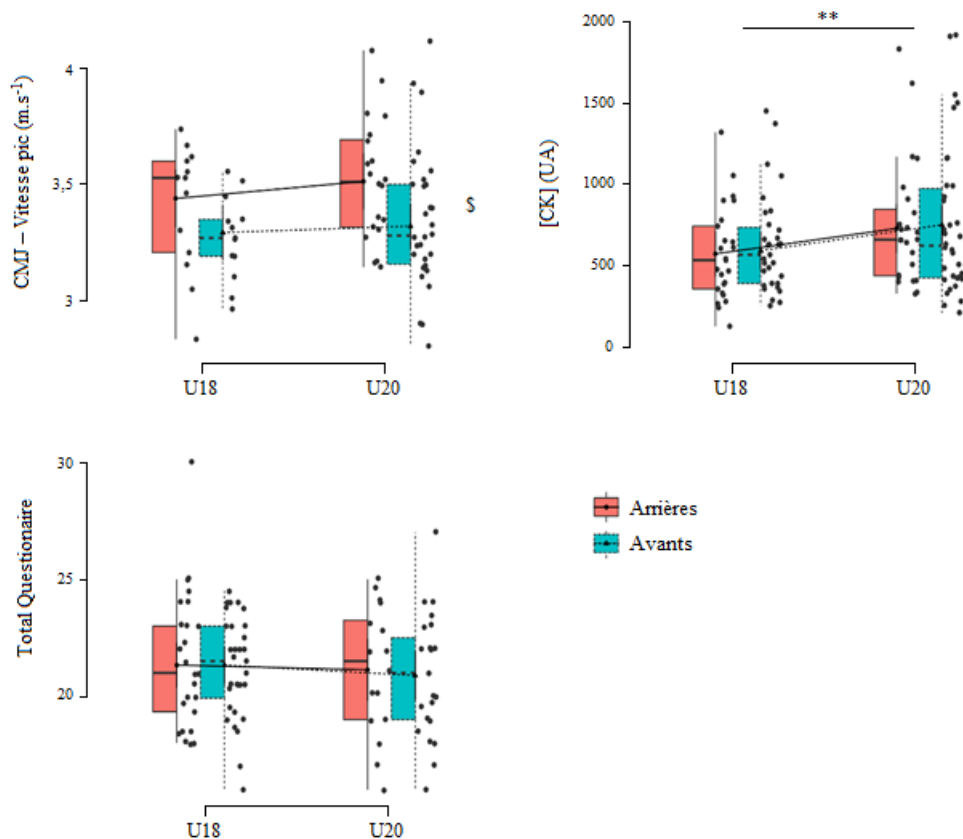


Figure 6.2 : Graphiques représentant les variables d'état de forme testées en fonction de la catégorie et du poste.

Abréviations : CMJ : countermovement jump ; [CK] : concentration en créatine kinase.

Tableau 6.3 : Résultats du modèle mixte ANOVA pour chaque test de la batterie d'évaluation de l'état de forme.

		F	p	p η^2
CMJ	Catégorie	0,82	0,367	0,007
	Poste	12,407	< 0,001 ***	0,092
	Catégorie * Poste	0,027	0,871	2,181e -4
[CK]	Catégorie	7,149	0,008 **	0,033
	Poste	2,453	0,119	0,012
	Catégorie * Poste	0,295	0,588	0,001
Questionnaire	Catégorie	0,395	0,53	0,002
	Poste	2,832e -4	0,987	1,609e -6
	Catégorie * Poste	0,545	0,461	0,003

Abréviations : CMJ : countermovement jump ; [CK] : concentration en créatine kinase.

*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$.

Charge externe et état de forme

Une matrice de corrélation de Pearson entre les variables d'état de forme et les variables de charge externe a été réalisée (Tableau 6.4). L'analyse de la matrice met en évidence une corrélation significative entre les performances au CMJ et la distance sprintée ($r = 0,212$, $p < 0,01$). La [CK] semble corrélée au temps de jeu, à la distance totale, et courue, au nombre d'accélération et de contacts (r compris entre 0,175 et 0,309, $p < 0,05$ à $p < 0,001$). Le total

des réponses au questionnaire semble négativement corrélé au nombre de contacts ($r = -0.185$, $p < 0,05$).

L'analyse de l'effet des variables de catégorie, de poste et de charge externe sur les variables d'état de forme est résumée dans le Tableau 6.5. Les résultats mettent en évidence que le poste et le nombre de contacts ont statistiquement un effet sur la vitesse pic mesurée au CMJ ($p < 0,001$ et $p < 0,01$, respectivement). Pour l'analyse de la [CK], seul le temps de jeu présente un effet significatif ($p < 0,05$). Pour finir, le nombre de contacts réalisés démontre un effet significatif sur la somme des réponses au questionnaire.

Tableau 6.4 : Matrice des corrélations entre les variables d'état de forme et les variables de charge externe.

		CMJ	[CK]	Questionnaire
Temps de jeu (min)	Obs. (n)	126	214	180
	R	0,14	0,31	-0,11
	p	0,13	< ,001 ***	0,14
Dist. totale (m)	Obs. (n)	126	214	180
	R	0,11	0,24	-0,09
	p	0,21	< ,001 ***	0,22
Dist. courue (m)	Obs. (n)	126	214	180
	R	0,14	0,18	-0,14
	p	0,12	0,01 *	0,07
Dist. sprintée (m)	Obs. (n)	126	214	180
	R	0,21	-0,02	-0,04
	p	0,02 *	0,82	0,63
Nb Accel (n)	Obs. (n)	126	214	180
	R	0,15	0,21	-0,02
	p	0,10	0,003 **	0,83
Nb Contacts (n)	Obs. (n)	126	214	180
	R	0,05	0,24	-0,19
	p	0,57	< ,001 ***	0,013 *

Abréviations : CMJ : countermovement jump ; [CK] : concentration en créatine kinase ; Accel : accélérations.

*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$.

Tableau 6.5 : Estimation de l'effet des variables de catégorie, de poste et de charge externe sur les variables d'état de forme.

	CMJ			[CK]			Questionnaire		
	Estimation (ES)	p	T	Estimation (ES)	p	T	Estimation (ES)	p	T
Catégorie	-0,02 (0,07)	0,71	-0,367	94,61 (57,55)	0,10	1,64	-0,26 (0,5)	0,60	-0,52
Poste	-0,33 (0,09)	3,12e-4 ***	-3,743	134,07 (86,98)	0,13	1,54	0,01 (0,7)	0,99	0,01
Temps de jeu (min)	0,01 (0,01)	0,18	1,347	7,05 (3,47)	0,04 *	2,03	0,0 (0,03)	0,72	0,35
Dist. totale (m)	-1,37e-4 (7,61e-5)	0,07	-1,799	-0,05 (0,05)	0,29	-1,07	-1,91e-6 (4,53)	1,00	0,00
Dist. courue (m)	1,26e-4 (1,70e-4)	0,46	0,742	0,11 (0,11)	0,34	0,96	-2,03e-3 (1,03e-3)	0,05	-1,96
Dist. sprintée (m)	5,29e-4 (7,07e-4)	0,46	0,748	-0,43 (0,56)	0,44	-0,77	-3,78e-3 (0,01)	0,46	-0,75
Nb Accel (n)	-1,78e-3 (3,65e-3)	0,63	-0,489	4,18 (2,77)	0,13	1,51	0,04 (0,03)	0,11	1,61
Nb Contacts (n)	0,01 (2,38e-3)	2,61e-3 **	3,076	0,78 (1,92)	0,68	0,41	-0,05 (0,02)	0,01 **	-2,72

Abréviations : ES : Erreur standard ; CMJ : countermovement jump ; [CK] : concentration en créatine kinase ; Accel : accélérations.

*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$.

6.4. DISCUSSION

L'objectif de l'étude était de caractériser et comparer l'état de forme des joueurs internationaux U18 et U20 en fonction des postes (avants et arrières) dans une fenêtre de +36h à +40h post-match, et évaluer l'impact de la charge externe sur les variables d'état de forme. Les résultats mettent en évidence qu'avec une charge externe liée au match plus conséquente pour les U20, aucune différence n'était à noter sur les performances au CMJ ou la perception de la fatigue entre les catégories, alors que des [CK] plus importantes chez les U20 que chez les U18. En entrant dans le détail, on observe un lien entre les [CK] et les variables de charge externe ($p < 0,05$ à $p < 0,001$), mais seul le temps de jeu semble avoir un effet significatif ($p < 0,05$) sur les [CK] observées. Aussi, le nombre de contacts réalisés a démontré un effet significatif sur la perception de la fatigue par le joueur ($p < 0,01$). Les variables de temps de jeu et de nombre de contacts réalisés sont donc à prendre en compte lorsque l'on établit un rapport de l'état de forme du joueur.

Évaluation de la charge externe

Le point d'entrée de cette étude visant à caractériser et comparer l'état de forme des jeunes joueurs internationaux U18 et U20 +36h à +40h post-match, était d'abord d'évaluer et comparer la charge de travail associée à ce match entre les catégories et les postes (avants et arrières). La présente étude démontre que les joueurs U20, quel que soit le poste, jouent plus longtemps, parcourent plus de distance totale et réalisent plus de contacts que les U18. Des différences qui ont déjà pu s'observer sur un public de jeunes joueurs d'académies anglaises (Read et al. 2017a, Read et al. 2018a). Les résultats de la présente étude, bien qu'opposés aux résultats de l'évaluation de la performance en match décrite dans l'Étude 2 avec des données relativisées au temps de jeu (Peeters et al. 2022), s'expliquent aisément par des règles de temps de jeu imposées, différentes entre les catégories. Les U18 évoluant dans des matchs de 70 minutes, contre 80 minutes en U20. En revanche, malgré des matchs plus longs chez les U20, aucune

différence n'a été observée avec les U18 concernant le volume de distance courue ($> 4 \text{ m.s}^{-1}$) et sprintée ($> 7 \text{ m.s}^{-1}$) et le nombre d'accélération réalisées ($> 2,5 \text{ m.s}^{-2}$). Cette observation confirme les résultats précédemment observés sur l'évaluation de la performance en match entre les U18 et U20 internationaux (Peeters et al. 2022), puisqu'avec un temps de jeu plus faible des U18, ils réalisent des performances identiques à leurs pairs. Les comparaisons aux postes vont dans le sens des résultats de la littérature (Read et al. 2017a, Read et al. 2017b, Read et al. 2018a, Peeters et al. 2022), avec des arrières qui ont une charge de travail plus importante que les avants sur l'ensemble des paramètres en lien avec du déplacement, et des avants qui réalisent plus de contacts que les arrières.

Évaluation de l'état de forme

Évaluation de la fonction neuromusculaire

L'évaluation de la fonction neuromusculaire, réalisée entre +36h et +40h post-match au moyen du CMJ ne révèle pas de différence entre les joueurs U18 et les U20. Seul un effet poste est mis en évidence dans l'analyse, avec des valeurs de vitesse concentrique pic supérieures chez les arrières que chez les avants. Un résultat aisément interprétable au regard des différences de qualités intrinsèques de puissance du bas du corps observées entre les avants et les arrières (Jones et al. 2019). En effet, les auteurs rapportent des données de vitesse concentrique maximale au CMJ supérieures chez les arrières que chez les avants. L'observation d'une différence de vitesse maximale au CMJ entre les avants et les arrières, faite dans la présente étude, serait donc liée non pas à un état de forme différent, mais à des qualités intrinsèques différentes entre les postes. Cette variable, témoin de la fonction neuromusculaire, a présenté une corrélation positive avec la distance sprintée ($r = 0,21, p < 0,05$). Une observation non surprenante puisque ces deux variables sont une manifestation des qualités de vitesse et de puissance des joueurs. Pour aller plus loin sur l'analyse de l'état de forme neuromusculaire des joueurs, le modèle linéaire mixte met en évidence que le poste et le nombre de contacts ont un

effet significatif sur la performance au CMJ ($p < 0,001$ et $p < 0,01$, respectivement). L'effet du poste est encore une fois explicable par les qualités intrinsèques des arrières par rapport aux avants. En revanche, l'effet positif du nombre de contacts sur les performances de vitesse en CMJ est plus surprenant. C'est-à-dire que plus les joueurs ont réalisé de contacts en match et meilleures sont les performances en CMJ. Ce qui semble être un résultat contrintuitif. L'hypothèse que nous pouvons formuler est que les joueurs ayant réalisé le plus de contacts sont en principe les joueurs avec le plus gros temps de jeu (les deux paramètres étant corrélés, $r = 0,28$, $p < 0,001$) et seraient donc des joueurs plutôt titulaires et donc probablement de meilleurs joueurs. Ces joueurs se distinguent donc potentiellement par de meilleures qualités de puissance que leurs partenaires. Et comme pour l'hypothèse explicative de l'effet du poste, les qualités intrinsèques des joueurs (le fait qu'il soit un meilleur joueur) pourraient être l'explication de l'effet significatif observé.

La concentration en Créatine Kinase ([CK])

La caractérisation de l'état de forme, observée dans la figure 6.2, met en évidence une différence significative de [CK] entre les joueurs U18 et les U20, avec des valeurs plus importantes relevées chez les joueurs plus âgés. Ce marqueur de dommage musculaire a démontré des liens avec les variables de charge externe ($p < 0,05$ à $p < 0,001$). Des résultats qui confirment les liens déjà observés chez des joueurs séniors élités, entre le temps de jeu et le nombre de collisions avec la [CK] (Smart et al. 2008). L'effet des collisions sur les [CK] a déjà été démontré à plusieurs reprises dans la littérature (Takarada 2003, Roe et al. 2017b). En effet, Roe et al. (2017b) avaient montré que 24h après un entraînement avec contacts la [CK] avait augmenté de 88 % par rapport aux valeurs pré-entraînement et que la [CK] +24h post-entraînement était presque certainement plus élevée suite à un entraînement avec contacts que sans contact. Or dans la présente étude, une analyse plus fine de l'effet des variables de charge externe sur les [CK] mesurées montre que seul le temps de jeu a un effet sur ce marqueur d'état

de forme ($p < 0,05$), à savoir que plus le temps de jeu est important et plus les valeurs de [CK] seront importantes. Le fait que dans la présente étude la variable de contact n'ait pas d'effet significatif sur la [CK] peut s'expliquer selon différentes hypothèses. D'abord, dans les travaux Roe et al. (2017b), les auteurs rapportent des [CK] +24h post-entraînement, à la différence de la présente étude où nous avons relevé des données dans une fenêtre de +36h à +40h. Or, la littérature a bien démontré un pic de concentration en CK à 24h (Takarada 2003), avec des variations allant jusqu'à $+326 \pm 78 \%$ (Roe et al. 2016c), et une cinétique visant vers des données à la baisse à partir de +48h (Takarada 2003, Roe et al. 2016c). On peut donc supposer qu'au regard de la nature individuelle des réponses biologiques des joueurs à la charge combattue (Roe et al. 2016c), et le moment auquel les données ont été recueillies, l'accumulation d'une charge globale, traduite par le temps de jeu semblerait avoir un effet sur les [CK] dans une fenêtre de +36h à +40h post-match. Un constat identique sur le nombre d'accélération réalisées nous est apparu. Les travaux de Jones et al. (2014) ont démontré des corrélations avec le nombre de sprints, assimilable au nombre d'accélération, et la variation de [CK] notamment chez les arrières. Les résultats de la présente étude démontrent également des corrélations entre ces paramètres, mais par ailleurs aucun effet du nombre d'accélération n'a été observé sur la [CK]. L'hypothèse d'une fenêtre trop tardive pour s'apercevoir de l'impact du nombre d'accélération sur les [CK].

La perception de la fatigue

Pour ce qui est de la perception de la fatigue par les joueurs, mesurée au moyen d'un questionnaire d'état de forme en 6 items, aucune différence entre les catégories et les postes n'a été relevée dans l'analyse. Il semble que l'analyse statistique complète mette en évidence que le nombre de contacts aurait un effet significatif ($p < 0,01$), en plus de la corrélation relevée ($r = -0,19, p < 0,05$), sur le score total des items d'états de forme évalués. L'effet « négatif » révélé par le modèle mixte linéaire signifie que plus le nombre de contacts est important, et plus le

score d'état de forme sera faible. Un constat déjà observé par Roe et al. (2017b), qui relevaient une diminution plus importante de la perception de l'état de forme du joueur suite à un entraînement avec contacts par rapport à un entraînement sans contact. Aucun autre paramètre ne semble influencer le score au questionnaire. Un résultat en cohérence avec les travaux de Lacombe et al. (2018) qui n'ont révélé aucune différence de score au questionnaire entre des joueurs avec un long temps de jeu par rapport à des joueurs à plus faibles temps de jeu lors d'un championnat du monde U20.

Pour finir, nous pouvons noter que pour l'ensemble des marqueurs d'état de forme testés, on constate une forte hétérogénéité des réponses des joueurs à la charge d'un match international (Figure 6.2). Les données collectives apportent une tendance intéressante et non négligeable pour le préparateur physique dans la planification de la semaine, mais on constate qu'une analyse individuelle précise est à mener pour personnaliser au mieux la charge d'entraînement des joueurs.

6.4.1. Limites

L'étude proposée présente des limitations à l'interprétation des données pour parler de fatigue. En effet, l'objectif de cette étude était d'évoluer dans le contexte écologique du protocole établi pour les équipes de France jeunes. Ainsi, seule une prise de données a été réalisée dans un intervalle de temps de +36h à +40h après le match pour individualiser la reprise de l'entraînement par les joueurs en fonction de leur état de forme, pour des raisons de contraintes de temps dans un contexte de compétition, et aussi de contraintes vis-à-vis des joueurs qui n'apprécient pas toujours le moment du prélèvement de sang, aussi peu volumineux soit-il. Or, pour parler de fatigue et de qualité de récupération, il aurait fallu connaître l'état de forme des joueurs avant le match comme ont pu le faire Lacombe et al. (2018) ou Ramírez-López et al. (2020b). De plus, pour évaluer l'effet de l'exigence physique du match sur l'état de forme des joueurs, il aurait été préférable d'évaluer l'effet des variables de charge externe sur les

variations des données d'état de forme avant et après le match. En effet, en fonction des matchs étudiés, le protocole de la compétition permettait une récupération de 7 jours entre les matchs et dans d'autres cas seulement 3 jours entre les matchs. Donc la connaissance de l'état de forme du jour pré-match apporterait une compréhension supplémentaire de l'impact du match sur les joueurs. Aussi, nous pouvons supposer qu'une évaluation +24h après le match, là où l'état de forme est le plus dégradé (Roe et al. 2016c, Ramírez-López et al. 2020b), permettrait de mieux comprendre l'impact du match sur les variations individuelles des joueurs en fonction de leur âge ou de leur poste. L'utilisation de nouvelles technologies comme le protège-dent instrumenté pourrait également permettre de mieux caractériser l'activité combattue des joueurs, ce qui pourrait nous aider à mieux comprendre le lien entre les contacts et l'état de forme du joueur. De plus, l'apport d'analyses biologiques complémentaires (sur la base du prélèvement déjà réalisé pour la CK), comme l'analyse de la concentration en protéine C réactive (CRP), témoin du niveau d'inflammation semblerait également être une contribution supplémentaire dans l'évaluation de la récupération des jeunes joueurs de rugby internationaux.

6.4.2. Conclusion

Parmi les marqueurs d'état de forme testés dans une fenêtre de +36h à +40h post-match, seule la [CK] présente une différence significative, avec des concentrations plus importantes chez les U20 que chez les U18. Nous avons également pu constater que des variables de temps de jeu et le nombre de contacts réalisés avaient un effet significatif sur les marqueurs d'état de forme. Pour finir, la nature fortement individuelle des réponses à la charge du match confirme l'intérêt d'une évaluation fine de l'état de forme de chaque joueur post-match.

6.5. APPLICATIONS PRATIQUES

- La forte hétérogénéité des états de forme observés chez les jeunes joueurs confirme l'intérêt d'une évaluation systématique avant la reprise de l'entraînement afin d'individualiser au mieux la charge de travail des joueurs.
- La prise en compte de données de charges externes (comme le temps de jeu et le nombre de contacts) par les préparateurs physiques pour évaluer l'état de forme de leurs joueurs est un indicateur supplémentaire au spectre d'informations utiles à la prise de décision pour le retour d'un joueur à l'entraînement.
- Au regard des résultats et des contraintes de temps et potentiellement budgétaires liées à l'évaluation de la [CK], et à l'image du critère de 20 minutes d'inclusion de cette étude, il ne semble pas justifié d'évaluer les joueurs ayant joué moins de 20 minutes lors du match.
- Les résultats ayant démontré des [CK] plus importantes chez les U20 que chez les U18, il nous semble que dans le cas du surclassement d'un joueur U18 en U20, il est préférable de prendre de grandes précautions quant à la reprise de l'entraînement pour ces jeunes joueurs.

7. CONCLUSIONS GÉNÉRALES, PERSPECTIVES ET APPLICATIONS PRATIQUES

7.1. CONCLUSION GÉNÉRALE

On peut aisément affirmer que la réussite sportive d'une fédération comme la Fédération Française de Rugby (Grand Chelem 2022 pour le XV de France, une troisième place en Coupe du Monde 2021 pour le XV de France féminin, une équipe de France à 7 féminine Vice-Championne Olympique 2020, une équipe de France U20 double championne du monde en titre) est en partie le fruit de la réussite du projet de formation des jeunes joueurs et joueuses en France. En effet, avec plus d'une centaine de joueurs et joueuses suivis pour chaque année d'âge entre 15 et 19 ans, les entraîneurs ont développé une réelle expertise empirique et trouvé la voie à emprunter pour aider les joueurs à accéder au plus haut niveau international.

Au cours de ce travail de thèse, l'objectif était d'apporter des éléments objectifs et chiffrés décrivant l'environnement de développement du jeune joueur de rugby de son entrée en structure de formation fédérale à 15 ans, jusqu'à l'équipe de France des moins de 20 ans (U20), dernière sélection du programme France Jeunes de la FFR. Pour répondre à cet objectif, le travail de thèse s'est divisé en trois grands piliers :

- 1) La caractérisation physique et anthropométrique des joueurs (Étude 1),
- 2) L'évaluation des exigences de déplacement et de combat en matchs internationaux (Étude 2)
- 3) L'impact de ces matchs sur les marqueurs de fatigue (Étude 3).

À notre connaissance, au commencement de ce travail de thèse, la littérature scientifique traitant chez les jeunes joueurs de rugby internationaux de ces thématiques de caractéristiques

physiques (Lombard et al. 2015, Vaz et al. 2015), de performances en match (Cunningham et al. 2016b, Carling et al. 2017) ou d'états de forme post-match (Lacome et al. 2018, Ramírez-López et al. 2020b) était peu fournie. L'originalité majeure de ce travail de thèse repose sur l'évaluation globale d'une population de joueurs internationaux sur plusieurs années d'âge, permettant ainsi de caractériser et de comparer les différentes catégories.

Étude 1 : L'évaluation des caractéristiques anthropométriques et physiques.

Au cours de notre revue de littérature, nous avons démontré l'intérêt d'évaluer physiquement le jeune joueur de rugby au cours de son développement. L'objectif de cette première étude, sur la base des données recueillies lors des périodes d'évaluations physiques, était d'identifier et caractériser les facteurs physiques discriminants les joueurs internationaux par rapport aux non-internationaux au cours du parcours de formation fédéral, de U16 à U20. Permettant ainsi d'identifier les qualités physiques prioritaires à l'accession au niveau international.

Les résultats présentés dans l'étude 1, montrant une amélioration des performances physiques entre U16 et U20 ne semblent en aucun cas surprenant, et ont précédemment été décrits dans la littérature (Darrall-Jones et al. 2015, Darrall-Jones et al. 2016b, Casserly et al. 2019). L'originalité de ce travail reposait sur l'identification des qualités physiques prioritaires dans la détection des jeunes joueurs de rugby internationaux français. Pour autant, il nous semblait indispensable de commencer l'analyse par une description fine des caractéristiques anthropométriques et physiques par catégorie (U16, U18 et U20). Comme chez nos homologues anglo-saxons pour des joueurs d'un niveau national, nous avons observé une amélioration des qualités physiques avec l'âge (Darrall-Jones et al. 2015, Darrall-Jones et al. 2016b). Ainsi, en vieillissant, les joueurs sont plus grands, plus lourds, plus rapides, plus forts, quel que soit le poste.

La comparaison entre les joueurs d'un statut international et les joueurs non-internationaux permet une lecture à plusieurs niveaux. D'abord, les résultats mettent en évidence que la batterie de tests utilisée permet une discrimination des joueurs internationaux. Aussi, on observe que les différences entre les statuts n'apparaissent pas au même moment du développement du joueur. Chez les joueurs internationaux, en fonction de leurs postes, certaines qualités se manifestent de façon plus précoce que chez les non-internationaux. Ainsi, on distingue que dès la catégorie U16, les avants internationaux ont une taille plus importante que les non-internationaux, que la vitesse courte ($< 10m$), quel que soit le poste est également déjà une qualité prioritaire chez les internationaux, et que la vitesse longue ($> 50m$) permet d'identifier les arrières internationaux en U16. À l'inverse, les qualités de force ne semblent permettre de différencier les internationaux qu'à partir de U18. À l'âge de 15 ans, à l'entrée en académie pôle espoirs, la force et notamment du haut du corps, n'est pas un élément différenciant les futurs internationaux. On comprend ce constat quand on s'intéresse à la prise en charge de l'entraînement physique dans la filière de préformation des clubs. En effet, avant 15 ans, la prise en charge physique des joueurs se centre quasiment exclusivement sur de l'agilité et de la technique de course. Expliquant une différenciation des statuts en U16. Alors que l'entraînement de la force commence souvent à partir de U16. Expliquant l'apparition plus tardive de différences entre les statuts, les internationaux ayant un gain de force plus important que leurs homologues non-internationaux. Un constat similaire est fait sur les qualités de puissance avec une différenciation des statuts à partir de U18.

Concernant les qualités énergétiques, nous ne constatons que très peu d'évolution au cours du parcours du joueur, avec très peu de différence liée au statut. Des résultats qui auraient pu être un peu différents avec l'utilisation d'un test plus spécifique à l'activité, notamment en proposant des changements de directions, comme par exemple le Yo-Yo IR1 test. Par ailleurs, les données de capacité énergétique récoltées dans l'Etude 1 offrent des repères bien spécifiques au poste

pour la détection des joueurs dans leur entrée en académie pôle espoirs. En effet, puisque c'est une qualité qui évolue peu, il semble que ce paramètre de capacité aérobie soit un prérequis important à l'intégration dans le PPF. La place d'une évaluation physiologique dans les tests de détection avant l'entrée en structure de formation fédérale prend ainsi tout son sens.

Au regard de l'ensemble de ces résultats, et en particulier l'absence de différence de force à l'entrée en structure fédérale (U16), il nous semble pertinent d'évaluer à l'avenir le niveau de maturité des joueurs et discuter de son effet sur le développement individuel du joueur. L'investigation spécifique de l'âge relatif pourrait nous aider à décrire et à expliquer l'évolution des joueurs au regard de leur date de naissance, critère déterminant dans la maturité du développement du jeune joueur.

L'interprétation et l'utilisation de l'ensemble de ces résultats apportent à la FFR de nombreuses applications pratiques. En tout premier lieu avec une utilisation directe des données des caractéristiques anthropométriques et physiques pour bâtir des barèmes évolutifs pour chaque test en fonction de l'âge et du poste. Ces données de référence étant basées sur les évaluations des jeunes internationaux de la catégorie. En diffusant ces précieuses informations dans les structures de formation fédérales, les entraîneurs du PPF ont de réelles clés pour suivre et évaluer la progression du joueur. Ensuite, ce travail de thèse a permis de confirmer l'utilisation d'une partie de cette batterie de tests pour la détection des joueurs avant leur entrée en structure de formation fédérale, et ainsi renforcer l'idée que les caractéristiques anthropométriques, énergétiques et de vitesse étaient des critères déterminants. L'une des observations faites par les entraîneurs concernant les joueurs français est une réelle carence de force et d'utilisation et de transfert de cette force dans les actions de combat, spécifique au rugby. Nous pensons que l'approche du travail de la force, et notamment du bas du corps, doit être renforcée sur les catégories jeunes et peut-être amorcée de façon plus anticipée qu'actuellement. Néanmoins, ces

travaux de recherche ont permis de poser les bases d'une identification de profils physiques compatibles avec les exigences du niveau international. Nous pouvons nuancer le propos en insistant sur le fait que la performance d'un joueur ne dépend pas exclusivement de ses ressources physiques et que nous ne pouvons pas décorrélérer les qualités physiques d'un joueur de ses qualités rugbystiques ou de ses ressources mentales. C'est pourquoi la FFR a mis en place le « Plan Partagé Individuel de Développement », un outil centralisant le suivi de toutes les ressources du joueur de son entrée en structure de formation fédérale et jusqu'aux équipes de France.

Étude 2 : L'analyse du déplacement et de l'activité spécifique de combat

La seconde partie de ce travail de thèse consistait à faire une analyse exhaustive de l'activité physique des jeunes joueurs U18 et U20 lors des rencontres internationales. Une activité caractérisée par le déplacement, à différentes allures, et par le nombre de contacts réalisés par les joueurs. L'originalité de ce travail de thèse, au-delà de la population d'internationaux étudiée, repose sur le niveau et la complémentarité des analyses proposées, en partant d'une analyse de l'activité moyenne des joueurs pour décrire ensuite les séquences de jeu plus intenses et plus marquantes pour les joueurs, chacune ayant un intérêt spécifique en termes de prise en charge des joueurs et de méthodologie d'entraînement.

Les données de déplacement moyen en match chez les U18 et les U20 rapportées dans cette étude confirment le haut niveau d'exigence physique des rencontres internationales par rapport aux données existantes dans la littérature pour ces catégories d'âge (Cunningham et al. 2016b, Read et al. 2018a). Le fait d'observer des volumes de courses (distance totale, ou à haute vitesse) et un nombre d'accélération plus importants chez les U18 que chez les U20 renforce les résultats avancés par Till et al. (2020). Ce constat nous permet d'affirmer qu'au niveau

international, les jeunes joueurs U18 français semblent être suffisamment préparés pour être capables de répondre aux exigences du niveau supérieur concernant le déplacement.

À l'instar des études ayant démontré des niveaux fluctuants de l'intensité au cours du match (Lacome et al. 2017, Tierney et al. 2017), nous avons souhaité analyser plus finement les matchs en analysant d'abord l'activité des joueurs exclusivement quand le ballon était en jeu, puis les séquences maximales d'activité (indépendamment du fait que le ballon soit en jeu ou non).

L'analyse des séquences de temps de jeu effectif, et en particulier des séquences longues (> 90s), renforce le constat d'une activité de déplacement plus importante chez les U18 que les U20. Cependant, les arrières U20 présentent une activité sprintée supérieure aux arrières U18. Des résultats à mettre en lien avec les capacités de vitesse supérieures des U20 par rapport aux U18 (Étude 1). Aussi, lorsque les séquences de temps de jeu effectif durent (> 90s), les avants U20 réalisent plus d'actions de combat que les avants U18. Ce qui suggère aux entraîneurs de renforcer la capacité des joueurs U18, et notamment les avants dans des circuits d'entraînements de répétitions et enchaînement d'actions de placages, déblayages ou soutien au ruck, avec pour consigne principale de vite se relever pour être disponible pour le jeu et recommencer les efforts.

La caractérisation de l'intensité maximale des matchs au moyen des moyennes glissantes offre une vision nouvelle de l'exigence du match du point de vue du déplacement et du contact. À la différence des autres analyses, très peu de différences dans l'activité de déplacement ont été observées sur les périodes pics, quel que soit le poste. En revanche, l'activité maximale combattue a été démontrée supérieure chez les avants U20 que les avants U18. Ces observations consolident les observations faites plus haut, à savoir que les joueurs U18 semblent prêts du point de vue de l'activité de déplacement à répondre aux exigences du niveau supérieur, avec un travail spécifique à apporter sur l'enchaînement des actions de contacts notamment chez les avants.

L'utilisation de la méthode des moyennes glissantes pour mesurer les intensités maximales relevées en match présente une originalité certaine dans l'analyse proposée. D'abord, à notre connaissance c'est la première étude à avoir comparé les U18 et les U20 en utilisant cette méthodologie, et à donner accès à ce genre de données pour chaque catégorie en discriminant les avants des arrières. Aussi, un transfert immédiat peut se faire avec l'entraînement. Cette approche écologique permet d'intégrer facilement les données récoltées en match comme des repères et des objectifs d'intensité à l'entraînement. L'une des remarques notables de la méthodologie employée serait d'avoir utilisé de façon indépendante les variables de distances et de contacts pour déterminer les séquences maximales d'activité. En effet, une fois que la caractérisation des intensités maximales aura été faite, il serait pertinent d'identifier les réponses physiologiques, grâce à l'utilisation associée de la fréquence cardiaque (FC). On peut d'ailleurs supposer que la distance parcourue et le nombre de contacts concomitant à cette période maximale, basée sur la FC, seraient sous-estimés par rapport aux données de séquences pics de déplacement et de contacts relevées (Figures 5.2 et 5.3). C'est pourquoi, les prochaines études devraient s'intéresser à l'utilisation de la FC (par exemple : % de FC maximale, temps passé au-dessus de 90% de la FC maximale), ou créer un modèle qui mesurerait les périodes où les distances et le nombre de contacts seraient maximisés.

Dans l'étude présentée, nous avons réussi à proposer une quantification simple des contacts basée sur le codage vidéo. Ceci nous a permis de déterminer que de façon globale sur le match, aucune différence n'était observée, mais que dans les séquences à forte intensité les U20 présentaient une fréquence de contacts plus importante. Or aujourd'hui, de nouvelles méthodes de traitement de données et technologies émergent et pourraient nous permettre de mieux caractériser l'activité de combat en match de rugby. En effet, grâce à l'instrumentalisation des protège-dents, nous pourrions être en mesure d'objectiver et décrire plus finement la charge combattue de nos joueurs (Jones et al. 2022). Nous pouvons peut-être supposer qu'au-delà du

nombre identique de contacts relevés entre les U18 et les U20, la charge totale subit par les U20 pourrait être plus grande due à une masse corporelle plus conséquente, une vitesse plus importante et donc un momentum plus grand (Étude 1) (Darrall-Jones et al. 2016b).

L'analyse que nous avons proposée présente de nombreuses applications pratiques automatiquement transférables et utilisables quotidiennement à la FFR. En tout premier point, ce large spectre d'analyse nous a permis de bâtir de solides référentiels de déplacement spécifiques au poste pour mieux interpréter la performance physique des joueurs au cours des matchs internationaux. Cette utilisation est évidemment non exclusive au niveau international, et nous a permis de confronter l'exigence physique du championnat domestique dans lequel évoluent les joueurs U20 (championnat Espoir) avec les données recueillies en sélection nationale (données non publiées). Pour compléter, ces références nous servent également à identifier si lors des tournois de sélections U16 à U18, l'aménagement des règles permet d'élever le niveau d'intensité de déplacement et d'identifier les joueurs susceptibles de répondre ou pas aux intensités du niveau international U18. Ensuite, au-delà de l'exploration des matchs, la méthodologie employée, et notamment les données des séquences maximales d'activité nous ont servi à créer des références fines pour planifier et analyser les séquences d'entraînement, en particulier à haute intensité. En modulant les espaces, les règles (ex. : différentes formes de contact) et les formes de jeu (ex. : jeux réduits), il est possible de planifier une « surcharge » de certains paramètres de charge externe (distance parcourue, nombre d'accélération ou de contacts) grâce à l'expertise développée. Ainsi, en jouant avec une faible densité de joueurs ou en offrant une supériorité numérique à l'attaque, les franchissements sont plus importants, en donnant une profondeur suffisante (entre 30 et 50 m) on pourra s'attendre à un gros volume sprinté. En augmentant la densité de joueurs ou en équilibrant le rapport de force attaque/défense, on s'attendra à une plus grande difficulté de franchissement et donc à un

volume conséquent du nombre d'accélération (enchaînement d'attaques et montées défensives). Avec une règle telle que « l'équipe qui marque garde la possession, en marquant les attaquants se retournent et jouent une sortie de camp », on va favoriser une surcharge de rythme de déplacement. Aussi, l'utilisation du jeu au pied va largement surcharger le volume de courses à haute intensité et de sprints. Pour finir, et en lien avec les structures de formation fédérales, ces résultats n'ont de sens que si les joueurs sont équipés de systèmes GPS. Ainsi, sur la base de ces travaux de recherche et dans un objectif d'optimisation des méthodes d'entraînement mises en place au sein de ces structures de formation, la FFR a décidé de déployer progressivement la technologie GPS sur l'ensemble du territoire.

Étude 3 : L'analyse de l'état de forme post-match

Cette dernière partie a permis de poursuivre notre compréhension des exigences physiques et physiologiques associées à des matchs internationaux jeunes en s'intéressant cette fois-ci à l'étude des marqueurs d'état de forme des joueurs post-match au moyen d'une batterie de tests régulièrement utilisés à la fois en recherche et en pratique en rugby Élite.

À la différence d'une exploration des performances physiques en match (comme dans l'Étude 2), qui propose une évaluation relativisée au temps de jeu, dans l'étude 3 il nous a semblé indispensable de repartir de l'étude du match, mais cette fois-ci en abordant les données de façon absolue pour comprendre l'impact de cette charge de travail globale sur le joueur. C'est sans surprise que nous avons évalué une charge de travail globalement plus importante chez les U20 que chez les U18 (ce qui s'explique par un temps de match plus long, 70 minutes vs 80 minutes), ainsi qu'une charge de déplacement plus grande chez les arrières que les avants, et l'inverse pour le contact.

Avec cette charge de travail plus grande observée chez les U20, nous avons observé sur les marqueurs de la fatigue, que seule la [CK] présentait une différence significative entre les catégories, à savoir une [CK] plus grande chez les U20 que les U18. Des résultats qui peuvent s'expliquer par un temps de jeu supérieur pour les U20, mais également par des masses musculaires mobilisées par les U20 plus conséquentes (plus d'actions de contacts, d'accélération/décélération et plus de sprints).

Grâce aux résultats présentés dans l'étude 3, nous pouvons affirmer que des données de charge de travail simples comme le temps de jeu ou le nombre de contacts réalisés, ont un impact significatif sur l'état de forme des joueurs et leur perception de la fatigue. Comme dans l'étude 2, l'utilisation, à l'avenir, de protège-dents instrumentés permettant de caractériser plus finement la charge combattue pourraient améliorer la connaissance de l'impact du contact sur le joueur.

Comme pour le reste de la littérature, l'hétérogénéité des réponses observées au travers des marqueurs de fatigue (objectifs ou subjectifs), nous pousse à confirmer l'utilisation d'une batterie de tests d'état de forme post-match (Roe et al. 2016c, Roe et al. 2017b, Ramírez-López et al. 2020b). En revanche, au regard du critère d'inclusion lié à un temps de jeu supérieur à 20 minutes, on peut penser que lors de l'évaluation de l'état de forme post-match, une orientation spécifique des tests peut être faite pour les joueurs au plus faible temps de jeu. Par exemple, +36h post-match, il ne semble pas utile de réaliser de dosage de la CK pour ces joueurs au regard de la cinétique d'évolution de la [CK] post-match (Takarada 2003, Lacombe et al. 2018).

Les résultats en lien avec l'étude de l'état de forme des joueurs post-match ont permis à une institution comme la FFR de confirmer et renforcer les choix de la méthodologie mise en place dans les équipes de France jeunes. Il est évident que cette méthodologie pose de nombreuses

contraintes, d'abord financière par rapport au cout des analyses de [CK], mais aussi des contraintes liées à des problématiques de ressources humaines ou matérielles. C'est pourquoi, toujours dans un souci de ruissèlement des méthodologies de la FFR vers les structures de formation fédérale, nous avons commencé par la manipulation d'outils simples comme le questionnaire pour mesurer l'état de forme des joueurs. Avec l'utilisation des questionnaires d'état de forme en début de semaine, les staffs des structures de formation fédérales ont accès rapidement à l'état de leur groupe pour ajuster la planification. Aussi, nous ne pouvons pas exclusivement corréler l'état de forme avec le match. En effet, la charge de travail proposée va également influencer l'état de forme. C'est pourquoi, dans un souci d'individualisation des besoins des jeunes joueurs, nous avons fait la recommandation d'une seconde utilisation du questionnaire. Ainsi, grâce à une première information de l'état de forme des joueurs le lundi, une première adaptation est envisageable. Et avec une seconde information le jeudi matin, les staffs ont l'option d'un allègement possible de la charge en vue du match du weekend. Toute cette méthodologie de suivi de l'état de forme du joueur doit évidemment être mise en lien avec un suivi de la charge de travail. L'apport du GPS offre une source d'informations de la charge de travail, qui peut être croisée avec l'utilisation de la RPE (Rate of Perceived Exertion) pour mesurer la charge de travail totale grâce à la session RPE ($sRPE = \text{durée} \times RPE$ (Foster et al. 1996)).

À la lecture de ce manuscrit de thèse, on pourrait souligner l'aspect très descriptif des protocoles déjà mis en place et utilisés à la FFR. Par ailleurs, il est important de souligner que nous avons réussi à mettre en place un travail exploratoire sur une population de très haut niveau et dans un contexte écologique, avec une participation totale des entraîneurs des équipes de France. Aussi, grâce à ce travail de thèse exploratoire, nous avons pu avoir une démarche commune d'analyse avec une expertise cohérente. Les résultats et les conclusions apportent aux

entraîneurs de la FFR une connaissance nouvelle et objective sur les populations jeunes pour planifier et contrôler le développement des meilleurs potentiels.

7.2. APPLICATIONS PRATIQUES

Au travers de ce travail de thèse, nous avons essayé d'améliorer la connaissance de l'environnement de développement du jeune joueur de rugby français de son entrée dans le projet de performance fédéral jusqu'à l'équipe de France des moins de 20 ans.

- L'évaluation physique est mise au cœur du Plan Partagé Individuel de Développement du jeune joueur de rugby français. Les données apportées par ce travail de thèse permettent de contrôler et d'identifier les joueurs à plus fort potentiel physique en fonction de leur âge et de leur poste grâce à la mise en place de barèmes pour chaque qualités physiques (vitesse courte, longue, force du haut et du bas du corps, puissance, capacité énergétique).
- Il est important de souligner que la taille, la vitesse et la capacité aérobie sont des indicateurs simples à évaluer et semblent être des prérequis à l'accès au projet de performance fédéral et par la suite aux Équipes de France.
- L'exploration fine des exigences des matchs internationaux ont permis la création de référentiels spécifiques au poste, relativisés par minutes sur le déplacement total, à haute intensité, sprinté et sur le nombre d'accélération afin d'évaluer les performances de déplacement réalisées par les joueurs dans un contexte de match international, de match de championnat domestique ou de matchs de détection.
- L'utilisation de la méthode des moyennes glissantes pour la mesure des séquences maximales d'activité courues ou de contacts apporte des repères précieux pour la planification fine des séquences d'entraînement, en particulier grâce à l'utilisation de jeux réduits pour surcharger des paramètres de déplacement.

- L'évaluation de l'état de forme des joueurs passe par la centralisation de multiples faisceaux d'informations de marqueurs de fatigue : CMJ, [CK] et le questionnaire d'état de forme (pouvant chacun mettre en évidence des alertes objectives de l'état de forme du joueur), mais aussi, plus simplement en prenant en compte des variables de charge de travail du match comme le temps de jeu ou le nombre de contacts réalisés.
- Le ruissèlement de la méthodologie d'évaluation de l'état de forme a amené la FFR à mettre en place des outils communs de suivi quotidien du joueur, constitué du suivi de la charge de travail et du suivi de l'état de forme des joueurs.
- Les différents résultats de ce travail de thèse auront permis d'alimenter et de créer un outil fédéral pour suivre le Plan Partagé Individuel de Développement du jeune joueur élite français. Grâce à cet outil, l'ensemble des ressources du joueur peuvent être évaluées avec la perspective des exigences du niveau international, en passant par le développement physique, les performances de déplacement en match corrélées à une performance rugbystique, et le suivi de la charge de travail et de l'état de forme des joueurs.

7.3. LIMITES

Bien que ce travail de thèse ait eu le mérite d'apporter des éléments descriptifs de l'environnement physique de développement du jeune joueur de rugby, il présente des limites. D'abord, et comme nous l'avons présenté dans la dénomination du manuscrit, nous avons fait un focus sur la dimension physique. Or on sait que l'approche de la performance en rugby ne peut en aucun cas se rapporter exclusivement à la performance physique. On observe par exemple des dérives dans l'utilisation des données chiffrées de performance de déplacement en match dans les débriefings de match. Ainsi, dans les travaux présentés, il a manqué la confrontation à des données d'évaluation rugby comme l'efficacité (ex. : des passes, de la

réussite au placage...) pour avoir une vision plus clairvoyante de la performance d'un joueur. Ensuite, dans les analyses proposées, on a observé de réelles limites aux outils ou méthodologies employées pour la quantification du contact, tâche très fastidieuse de codage et de synchronisation des différentes sources de données (codage vidéo et GPS) et pour la qualification du contact, rendue impossible sans l'apport de nouvelles technologies. Pour finir, même si ce travail répondait à une commande fédérale centrée sur les jeunes joueurs, il nous semble qu'il aurait pu être très intéressant d'étendre le spectre de la population jusqu'à l'équipe de France sénior, ce qui aurait pu nous permettre d'enrichir notre connaissance de l'environnement de développement du joueur tout au long de sa carrière : en partant des qualités physiques prioritaires au plus haut niveau sénior jusqu'à leur expression dans l'activité en match.

7.4. PERSPECTIVES

Tout au long de ce document de thèse ont été mises en lumière de nouvelles perspectives de travail pour permettre d'améliorer encore un peu plus la connaissance des profils physiques des joueurs et l'environnement compétitif dans lequel ils évoluent.

- Nous sommes persuadés qu'il serait très intéressant d'investiguer le lien entre les séquences maximales d'activité et les conséquences sur le jeu, à la fois positives ou négatives (points marqués ou encaissés, pénalités, évolution de l'efficacité, etc.). Le travail devrait d'abord consister en une contextualisation des périodes maximales d'activité : attaque, défense, localisation sur le terrain, etc., pour pouvoir ensuite définir en fonction du contexte, et de la finalité positive ou négative des actions des indicateurs clés de la performance physique.
- En vue de mieux comprendre les différences physiques observées à l'entrée en structure de formation fédérale, il semblerait pertinent de pousser les investigations vers des

facteurs tels que la maturité en lien avec l'âge relatif ou l'exploration des facteurs environnementaux comme les expériences sportives. Interroger le poids de la maturité dans le développement du jeune joueur en prenant en compte l'âge relatif du joueur permettra de mieux appréhender et estimer son potentiel. Cette démarche pourrait alors commencer avant l'entrée en structure fédérale, dans les regroupements de détection en moins de 15 ans. Ensuite, poursuivre l'analyse des profils physiques et anthropométriques chez les joueurs séniors, et notamment internationaux, au-delà de la catégorie U20, permettra à la FFR d'identifier les caractéristiques physiques prioritaires à détecter et développer pour atteindre le plus haut niveau sénior.

- L'étude quantitative du contact que nous avons proposée s'est centrée sur une quantification manuelle et donc plutôt fastidieuse. Or, grâce au développement en matière de traitement des signaux provenant de la centrale inertielle du GPS et sur la base de techniques d'apprentissage automatique (« machine learning »), une optimisation de la quantification du contact apparaît petit à petit, à l'image du paramètre de « Contact Involvement » proposé par Catapult Sport, qui mérite de continuer à être étudié. Un versant plus qualitatif du contact devrait également rapidement être exploré grâce à l'intégration de technologies nouvelles comme le protège-dent instrumenté qui permettra de caractériser plus finement la charge combattue des joueurs pour mieux évaluer la performance en match, l'impact sur les marqueurs de la fatigue. Toute cette démarche autour du contact s'inscrivant évidemment dans une démarche préventive (notamment pour la détection des commotions cérébrales).
- Étendre les méthodologies d'analyse utilisées dans les différentes études vers le secteur féminin permettra à une entité comme la FFR d'améliorer les méthodologies d'entraînement, de développer et de mieux détecter les filles susceptibles d'atteindre le niveau international.

8. BIBLIOGRAPHIE

Akenhead, R., D. French, K. G. Thompson and P. R. Hayes (2014). "The acceleration dependent validity and reliability of 10 Hz GPS." Journal of Science and Medicine in Sport **17**(5): 562-566.

Appleby, B., R. U. Newton and P. Cormie (2012). "Changes in strength over a 2-year period in professional rugby union players." The Journal of Strength & Conditioning Research **26**(9): 2538-2546.

Argus, C. K., N. D. Gill and J. W. Keogh (2012). "Characterization of the differences in strength and power between different levels of competition in rugby union athletes." The Journal of Strength & Conditioning Research **26**(10): 2698-2704.

Austin, D., T. Gabbett and D. Jenkins (2011). "The physical demands of Super 14 rugby union." Journal of Science and Medicine in Sport **14**(3): 259-263.

Bagger, M., P. Petersen and P. Pedersen (2003). "Biological variation in variables associated with exercise training." International Journal of Sports Medicine **24**(06): 433-440.

Baird, M. F., S. M. Graham, J. S. Baker and G. F. Bickerstaff (2012). "Creatine-kinase-and exercise-related muscle damage implications for muscle performance and recovery." Journal of Nutrition and Metabolism **2012**.

Baker, D. (2002). "Differences in strength and power among junior-high, senior-high, college-aged, and elite professional rugby league players." Journal of Strength and Conditioning Research **16**(4): 581-585.

Bangsbo, J., F. M. Iaia and P. Krstrup (2008). "The Yo-Yo intermittent recovery test." Sports Medicine **38**(1): 37-51.

Banister, E. W., T. W. Calvert, M. V. Savage and T. Bach (1975). "A systems model of training for athletic performance." Aust J Sports Med **7**(3): 57-61.

Barr, M. J., J. M. Sheppard, T. J. Gabbett and R. U. Newton (2014). "Long-term training-induced changes in sprinting speed and sprint momentum in elite rugby union players." The Journal of Strength & Conditioning Research **28**(10): 2724-2731.

Batterham, A. M. and W. G. Hopkins (2006). "Making meaningful inferences about magnitudes." International journal of sports physiology and performance **1**(1): 50-57.

Beard, A., R. Chambers, G. P. Millet and F. Brocherie (2019). "Comparison of game movement positional profiles between professional Club and senior international rugby union players." International Journal of Sports Medicine **40**(06): 385-389.

Bell, W. (1973). "Anthropometry of the young adult college rugby player in Wales." British journal of sports medicine **7**(1-2): 298.

Bell, W. (1980). "Body composition and maximal aerobic power of rugby union forwards." The Journal of sports medicine and physical fitness **20**(4): 447-451.

Bergeron, M. F., M. Mountjoy, N. Armstrong, M. Chia, J. Côté, C. A. Emery, A. Faigenbaum, G. Hall, S. Kriemler and M. Léglise (2015). "International Olympic Committee consensus statement on youth athletic development." British journal of sports medicine **49**(13): 843-851.

Billat, V., J. Renoux, J. Pinoteau, B. Petit and J. Koralsztein (1995). "Times to exhaustion at 90,100 and 105% of velocity at VO₂ max (Maximal aerobic speed) and critical speed in elite longdistance runners." Archives of Physiology and Biochemistry **103**(2): 129-135.

Billat, V., J. C. Renoux, J. Pinoteau, B. Petit and J. P. Koralsztein (1994). "Times to exhaustion at 100% of velocity at VO₂ max and modelling of the time-limit/velocity relationship in elite long-distance runners." European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology **69**(3): 271-273.

Bishop, D., O. Girard and A. Mendez-Villanueva (2011). "Repeated-sprint ability—Part II." Sports Medicine **41**(9): 741-756.

Boksem, M. A. and M. Tops (2008). "Mental fatigue: costs and benefits." Brain research reviews **59**(1): 125-139.

Boyd, L. J., K. Ball and R. J. Aughey (2011). "The reliability of MinimaxX accelerometers for measuring physical activity in Australian football." International journal of sports physiology and performance **6**(3): 311-321.

Bradley, W. J., B. P. Cavanagh, W. Douglas, T. F. Donovan, J. P. Morton and G. L. Close (2015). "Quantification of training load, energy intake, and physiological adaptations during a rugby preseason: a case study from an elite European rugby union squad." The Journal of Strength & Conditioning Research **29**(2): 534-544.

Brancaccio, P., G. Lippi and N. Maffulli (2010). "Biochemical markers of muscular damage." Clinical Chemistry and Laboratory Medicine **48**(6): 757-767.

Brazier, J., M. Antrobus, G. K. Stebbings, S. H. Day, P. Callus, R. M. Erskine, M. A. Bennett, L. P. Kilduff and A. G. Williams (2020). "Anthropometric and physiological characteristics of elite male rugby athletes." The Journal of Strength & Conditioning Research **34**(6): 1790-1801.

Buchheit, M. (2008). "The 30-15 intermittent fitness test: accuracy for individualizing interval training of young intermittent sport players." The Journal of Strength & Conditioning Research **22**(2): 365-374.

Buchheit, M., H. Al Haddad, B. M. Simpson, D. Palazzi, P. C. Bourdon, V. Di Salvo and A. Mendez-Villanueva (2014). "Monitoring accelerations with GPS in football: time to slow down?" International journal of sports physiology and performance **9**(3): 442-445.

Buchheit, M., M. Lacombe, Y. Cholley and B. M. Simpson (2018). "Neuromuscular responses to conditioned soccer sessions assessed via GPS-embedded accelerometers: insights into tactical periodization." International journal of sports physiology and performance **13**(5): 577-583.

Buchheit, M. and P. B. Laursen (2013). "High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle." Sports Medicine **43**(5): 313-338.

Cahill, N., K. Lamb, P. Worsfold, R. Headey and S. Murray (2013). "The movement characteristics of English Premiership rugby union players." Journal of Sports Sciences **31**(3): 229-237.

Campbell, P. G., J. M. Peake and G. M. Minett (2018). "The specificity of rugby union training sessions in preparation for match demands." International journal of sports physiology and performance **13**(4): 496-503.

Carling, C. and G. Dupont (2011). "Are declines in physical performance associated with a reduction in skill-related performance during professional soccer match-play?" Journal of Sports Sciences **29**(1): 63-71.

Carling, C., M. Lacombe, A. McCall, G. Dupont, F. Le Gall, B. Simpson and M. Buchheit (2018). "Monitoring of post-match fatigue in professional soccer: welcome to the real world." Sports Medicine **48**(12): 2695-2702.

Carling, C. J., M. Lacombe, E. Flanagan, P. O'Doherty and J. Piscione (2017). "Exposure time, running and skill-related performance in international u20 rugby union players during an intensified tournament." PloS one **12**(11): e0186874.

Casserly, N., R. Neville, M. Ditroilo and A. Grainger (2019). "Longitudinal changes in the physical development of Elite Adolescent rugby union players: Effect of playing position and body mass change." International journal of sports physiology and performance **15**(4): 520-527.

Cazorla, G. (1990). "Tests de terrain pour évaluer la capacité aérobie et la vitesse maximale aérobie." Cazorla G, Robert et G. L'évaluation en activité physique et en sport. Cestas: AREAPS: 151-174.

Cazorla, G., L. Boussaidi and M. Godemet (2004). "Evaluation du rugbyman de haut niveau à partir de tests de terrain."

Chiwaridzo, M., G. D. Ferguson and B. C. Smits-Engelsman (2019). "Anthropometric, physiological characteristics and rugby-specific game skills discriminating Zimbabwean under-16 male adolescent rugby players by level of competition." BMJ Open Sport & Exercise Medicine **5**(1): e000576.

Clavel, P., C. Leduc, J.-B. Morin, C. Owen, P. Samozino, A. Peeters, M. Buchheit and M. Lacombe (2022). "Concurrent Validity and Reliability of Sprinting Force–Velocity Profile Assessed With GPS Devices in Elite Athletes." International journal of sports physiology and performance **1**(aop): 1-5.

Cohen, J. (2013). Statistical power analysis for the behavioral sciences, Routledge.

Condello, G., C. Minganti, C. Lupo, C. Benvenuti, D. Pacini and A. Tessitore (2013). "Evaluation of change-of-direction movements in young rugby players." International journal of sports physiology and performance **8**(1): 52-56.

Cormack, S. J., R. U. Newton, M. R. McGuigan and P. Cormie (2008). "Neuromuscular and endocrine responses of elite players during an Australian rules football season." International Journal of Sports Physiology and Performance **3**(4).

Coughlan, G. F., B. S. Green, P. T. Pook, E. Toolan and S. P. O'Connor (2011). "Physical game demands in elite rugby union: a global positioning system analysis and possible implications for rehabilitation." Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy **41**(8): 600-605.

Coutts, A. J. and R. Duffield (2010). "Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports." Journal of Science and Medicine in Sport **13**(1): 133-135.

Crang, Z. L., G. Duthie, M. H. Cole, J. Weakley, A. Hewitt and R. D. Johnston (2020). "The validity and reliability of wearable microtechnology for intermittent team sports: A systematic review." Sports Medicine: 1-17.

Crewther, B. T., L. P. Kilduff, C. Cook, D. Cunningham, P. Bunce, R. Bracken and C. M. Gaviglio (2012). "Scaling strength and power for body mass differences in rugby union players." J Sports Med Phys Fitness **52**(1): 27-32.

Cross, M. R., M. Brughelli, S. R. Brown, P. Samozino, N. D. Gill, J. B. Cronin and J.-B. Morin (2015). "Mechanical properties of sprinting in elite rugby union and rugby league." International journal of sports physiology and performance **10**(6): 695-702.

Cummins, C., R. Orr, H. O'Connor and C. West (2013). "Global positioning systems (GPS) and microtechnology sensors in team sports: a systematic review." Sports Medicine **43**(10): 1025-1042.

Cunniffe, B., W. Proctor, J. S. Baker and B. Davies (2009). "An evaluation of the physiological demands of elite rugby union using global positioning system tracking software." The Journal of Strength & Conditioning Research **23**(4): 1195-1203.

Cunningham, D., D. A. Shearer, S. Drawer, R. Eager, N. Taylor, C. Cook and L. P. Kilduff (2016a). "Movement demands of elite U20 international rugby union players." PloS one **11**(4): e0153275.

Cunningham, D., D. West, N. Owen, D. Shearer, C. Finn, R. Bracken, B. Crewther, P. Scott, C. Cook and L. Kilduff (2013). "Strength and power predictors of sprinting performance in professional rugby players."

Cunningham, D. J., D. A. Shearer, N. Carter, S. Drawer, B. Pollard, M. Bennett, R. Eager, C. J. Cook, J. Farrell and M. Russell (2018a). "Assessing worst case scenarios in movement demands derived from global positioning systems during international rugby union matches: Rolling averages versus fixed length epochs." PloS one **13**(4): e0195197.

Cunningham, D. J., D. A. Shearer, S. Drawer, B. Pollard, C. J. Cook, M. Bennett, M. Russell and L. P. Kilduff (2018b). "Relationships between physical qualities and key performance indicators during match-play in senior international rugby union players." PloS one **13**(9): e0202811.

Cunningham, D. J., D. A. Shearer, S. Drawer, B. Pollard, R. Eager, N. Taylor, C. J. Cook and L. P. Kilduff (2016b). "Movement demands of elite under-20s and senior international rugby union players." PloS one **11**(11): e0164990.

da Silva, B. V. C., M. A. d. M. Simim, R. B. da Silva, E. L. Mendes, B. N. Ide, M. Marocolo, J. S. Martin and G. R. Mota (2020). "Time course of recovery for performance attributes and circulating markers of muscle damage following a rugby union match in amateur athletes." Sports **8**(5): 64.

Darrall-Jones, J., G. Roe, S. Carney, R. Clayton, P. Phibbs, D. Read, J. Weakley, K. Till and B. Jones (2016a). "The effect of body mass on the 30-15 intermittent fitness test in rugby union players." International journal of sports physiology and performance **11**(3): 400-403.

Darrall-Jones, J. D., B. Jones and K. Till (2015). "Anthropometric and physical profiles of English academy rugby union players." The Journal of Strength & Conditioning Research **29**(8): 2086-2096.

Darrall-Jones, J. D., B. Jones and K. Till (2016b). "Anthropometric, sprint, and high-intensity running profiles of English academy rugby union players by position." The Journal of Strength & Conditioning Research **30**(5): 1348-1358.

Dean, J., J. Whelan and A. Meyers (1990). An incredibly quick way to assess mood states: The incredibly short POMS. annual conference of the Association for the Advancement of Applied Sport Psychology.

Delaney, J. A., C. J. Cummins, H. R. Thornton and G. M. Duthie (2018). "Importance, reliability, and usefulness of acceleration measures in team sports." The Journal of Strength & Conditioning Research **32**(12): 3485-3493.

Delaney, J. A., T. J. Scott, H. R. Thornton, K. J. Bennett, D. Gay, G. M. Duthie and B. J. Dascombe (2015). "Establishing duration-specific running intensities from match-play analysis in rugby league." International journal of sports physiology and performance **10**(6): 725-731.

Delaney, J. A., H. R. Thornton, D. J. Burgess, B. J. Dascombe and G. M. Duthie (2017a). "Duration-specific running intensities of Australian Football match-play." Journal of Science and Medicine in Sport **20**(7): 689-694.

Delaney, J. A., H. R. Thornton, J. F. Pryor, A. M. Stewart, B. J. Dascombe and G. M. Duthie (2017b). "Peak running intensity of international rugby: implications for training prescription." International journal of sports physiology and performance **12**(8): 1039-1045.

Delaney, J. A., H. R. Thornton, A. E. Rowell, B. J. Dascombe, R. J. Aughey and G. M. Duthie (2017c). "Modelling the decrement in running intensity within professional soccer players." Science and Medicine in Football **2**(2): 86-92.

Deutsch, M., G. Kearney and N. Rehrer (2007). "Time–motion analysis of professional rugby union players during match-play." Journal of Sports Sciences **25**(4): 461-472.

Deutsch, M., G. Maw, D. Jenkins and 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): 561-570.

Di Salvo, V., A. Collins, B. McNeill and M. Cardinale (2006). "Validation of Prozone®: A new video-based performance analysis system." International Journal of Performance Analysis in Sport **6**(1): 108-119.

Dimundo, F., M. Cole, R. C. Blagrove, A. B. McAuley, K. Till and A. L. Kelly (2021). "Talent identification in an English Premiership rugby union academy: Multidisciplinary characteristics of selected and non-selected male under-15 players." Frontiers in Sports and Active Living **3**: 162.

Dubois, R., T. Paillard, M. Lyons, D. McGrath, O. Maurelli and J. Prioux (2017). "Running and metabolic demands of elite rugby union assessed using traditional, metabolic power, and heart rate monitoring methods." Journal of sports science & medicine **16**(1): 84.

Duthie, G., D. Pyne and S. Hooper (2003). "Applied physiology and game analysis of rugby union." Sports Medicine **33**(13): 973-991.

Duthie, G., D. Pyne and S. Hooper (2005). "Time motion analysis of 2001 and 2002 super 12 rugby." Journal of Sports Sciences **23**(5): 523-530.

Duthie, G. M. (2005). "High Body Mass Index is not a barrier to physical activity: Analysis of international rugby players' anthropometric data." European journal of sport science **5**(2): 77-77.

Duthie, G. M. (2006). "A framework for the physical development of elite rugby union players." International journal of sports physiology and performance **1**(1): 2-13.

Eaves, J. S., D. M. Hughes and L. K. Lamb (2005). "The consequences of the introduction of professional playing status on game action variables in international northern hemisphere rugby union football." International Journal of Performance Analysis in Sport **5**(2): 58-86.

Eaves, S. and M. Hughes (2003). "Patterns of play of international rugby union teams before and after the introduction of professional status." International Journal of Performance Analysis in Sport **3**(2): 103-111.

Enoka, R. M. and J. Duchateau (2008). "Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function." The Journal of physiology **586**(1): 11-23.

Enoka, R. M. and J. Duchateau (2016). "Translating fatigue to human performance." Medicine and Science in Sports and Exercise **48**(11): 2228.

Fontana, F. Y., A. Colosio, G. F. De Roia, G. Da Lozzo and S. Pogliaghi (2015). "Anthropometrics of Italian senior male rugby union players: from elite to second division." International journal of sports physiology and performance **10**(6): 674-680.

Fontana, F. Y., A. L. Colosio, G. Da Lozzo and S. Pogliaghi (2017). "Player's success prediction in rugby union: From youth performance to senior level placing." Journal of Science and Medicine in Sport **20**(4): 409-414.

Fornasier-Santos, C., G. P. Millet and X. 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): 504-512.

Foster, C., E. Daines, L. Hector, A. C. Snyder and R. Welsh (1996). "Athletic performance in relation to training load." Wisconsin Medical Journal **95**(6): 370-374.

Fuller, C. W., A. E. Taylor, J. H. Brooks and S. P. Kemp (2013). "Changes in the stature, body mass and age of English professional rugby players: a 10-year review." Journal of Sports Sciences **31**(7): 795-802.

Gabbett, T., J. Kelly and T. Pezet (2008). "A comparison of fitness and skill among playing positions in sub-elite rugby league players." Journal of Science and Medicine in Sport **11**(6): 585-592.

Gabbett, T. J. (2012). "Sprinting patterns of national rugby league competition." The Journal of Strength & Conditioning Research **26**(1): 121-130.

Gabbett, T. J. (2016). "Influence of fatigue on tackling ability in rugby league players: role of muscular strength, endurance, and aerobic qualities." PloS one **11**(10): e0163161.

Gabbett, T. J., D. G. Jenkins and B. Abernethy (2011). "Physical collisions and injury in professional rugby league match-play." Journal of Science and Medicine in Sport **14**(3): 210-215.

Galvin, H. M., K. Cooke, D. P. Sumners, K. N. Mileva and J. L. Bowtell (2013). "Repeated sprint training in normobaric hypoxia." British journal of sports medicine **47**(Suppl 1): i74-i79.

Gandevia, S. C. (2001). "Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue." Physiological Reviews.

Gannon, E. A., K. A. Stokes and G. Trewartha (2016). "Strength and power development in professional rugby union players over a training and playing season." International journal of sports physiology and performance **11**(3): 381-387.

Gastin, P. B., O. C. Mclean, R. V. Breed and M. Spittle (2014). "Tackle and impact detection in elite Australian football using wearable microsensor technology." Journal of Sports Sciences **32**(10): 947-953.

Gastin, P. B., D. Meyer and D. Robinson (2013). "Perceptions of wellness to monitor adaptive responses to training and competition in elite Australian football." The Journal of Strength & Conditioning Research **27**(9): 2518-2526.

Glaise, P., B. Morel, I. Rogowski, B. Cornu and C. Martin (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**.

Glatthorn, J. F., S. Gouge, S. Nussbaumer, S. Stauffacher, F. M. Impellizzeri and N. A. Maffiuletti (2011). "Validity and reliability of Optojump photoelectric cells for estimating vertical jump height." The Journal of Strength & Conditioning Research **25**(2): 556-560.

Granatelli, G., T. J. Gabbett, G. Briotti, J. Padulo, A. Buglione, S. D'ottavio and B. M. Ruscello (2014). "Match analysis and temporal patterns of fatigue in rugby sevens." The Journal of Strength & Conditioning Research **28**(3): 728-734.

Gray, A. J., D. Jenkins, M. H. Andrews, D. R. Taaffe and M. L. Glover (2010). "Validity and reliability of GPS for measuring distance travelled in field-based team sports." Journal of Sports Sciences **28**(12): 1319-1325.

Hamlin, M. J., R. W. Deuchrass, C. E. Elliot and N. Manimmanakorn (2021). "Short and long-term differences in anthropometric characteristics and physical performance between male rugby players that became professional or remained amateur." Journal of Exercise Science & Fitness **19**(3): 143-149.

Hamlin, M. J., C. J. Mitchell, F. D. Ward, N. Draper, J. P. Shearman and N. E. Kimber (2012). "Effect of compression garments on short-term recovery of repeated sprint and 3-km running performance in rugby union players." The Journal of Strength & Conditioning Research **26**(11): 2975-2982.

Hamlin, M. J., P. D. Olsen, H. C. Marshall, C. A. Lizamore and C. A. Elliot (2017). "Hypoxic repeat sprint training improves rugby player's repeated sprint but not endurance performance." Frontiers in Physiology **8**: 24.

Harper, D. J., C. Carling and J. Kiely (2019). "High-intensity acceleration and deceleration demands in elite team sports competitive match play: a systematic review and meta-analysis of observational studies." Sports Medicine **49**(12): 1923-1947.

Hartwig, T. B., G. Naughton and J. Searl (2008). "Defining the volume and intensity of sport participation in adolescent rugby union players." International journal of sports physiology and performance **3**(1): 94-106.

Haugen, T. and M. Buchheit (2016). "Sprint running performance monitoring: methodological and practical considerations." Sports Medicine **46**(5): 641-656.

Hendricks, S., D. Karpul and M. Lambert (2014a). "Momentum and kinetic energy before the tackle in rugby union." Journal of sports science & medicine **13**(3): 557.

Hendricks, S., B. Matthews, B. Roode and M. Lambert (2014b). "Tackler characteristics associated with tackle performance in rugby union." European journal of sport science **14**(8): 753-762.

Hill, A. V. (1938). "The heat of shortening and the dynamic constants of muscle." Proceedings of the Royal Society of London. Series B-Biological Sciences **126**(843): 136-195.

Hooper, S. L. and L. T. Mackinnon (1995). "Monitoring overtraining in athletes." Sports Medicine **20**(5): 321-327.

Hopkins, W., S. Marshall, A. Batterham and J. Hanin (2009). "Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science." Medicine & Science in Sports & Exercise **41**(1): 3.

Hopkins, W. G. (2007). "A spreadsheet for deriving a confidence interval, mechanistic inference and clinical inference from a P value." Sports Science **11**: 16-21.

Huerta-Alardín, A. L., J. Varon and P. E. Marik (2004). "Bench-to-bedside review: Rhabdomyolysis—an overview for clinicians." Critical care **9**(2): 1-12.

Ishii, A., M. Tanaka and Y. Watanabe (2014). "Neural mechanisms of mental fatigue." Reviews in the Neurosciences **25**(4): 469-479.

Johnston, R. D., T. J. Gabbett and D. G. Jenkins (2013a). "Influence of an intensified competition on fatigue and match performance in junior rugby league players." Journal of Science and Medicine in Sport **16**(5): 460-465.

Johnston, R. D., T. J. Gabbett and D. G. Jenkins (2014a). "Applied sport science of rugby league." Sports Medicine **44**(8): 1087-1100.

Johnston, R. D., T. J. Gabbett, D. G. Jenkins and B. T. Hulin (2015). "Influence of physical qualities on post-match fatigue in rugby league players." Journal of Science and Medicine in Sport **18**(2): 209-213.

Johnston, R. D., T. J. Gabbett, A. J. Seibold and D. G. Jenkins (2014b). "Influence of physical contact on neuromuscular fatigue and markers of muscle damage following small-sided games." Journal of Science and Medicine in Sport **17**(5): 535-540.

Johnston, R. D., N. V. Gibson, C. Twist, T. J. Gabbett, S. A. MacNay and N. G. MacFarlane (2013b). "Physiological responses to an intensified period of rugby league competition." The Journal of Strength & Conditioning Research **27**(3): 643-654.

Jones, B., J. Tooby, D. Weaving, K. Till, C. Owen, M. Begonia, K. A. Stokes, S. Rowson, G. Phillips and S. Hendricks (2022). "Ready for impact? A validity and feasibility study of instrumented mouthguards (iMGs)." British journal of sports medicine.

Jones, B., D. Weaving, J. Tee, J. Darrall-Jones, J. Weakley, P. Phibbs, D. Read, G. Roe, S. Hendricks and K. Till (2018). "Bigger, stronger, faster, fitter: the differences in physical qualities of school and academy rugby union players." Journal of Sports Sciences **36**(21): 2399-2404.

Jones, D., J. Round and A. De Haan (2005). *Physiologie du muscle squelettique: de la structure au mouvement*, Masson–Paris–pages.

Jones, M. R., D. J. West, B. T. Crewther, C. J. Cook and L. P. Kilduff (2015). "Quantifying positional and temporal movement patterns in professional rugby union using global positioning system." European journal of sport science **15**(6): 488-496.

Jones, M. R., D. J. West, B. J. Harrington, C. J. Cook, R. M. Bracken, D. A. Shearer and L. P. Kilduff (2014). "Match play performance characteristics that predict post-match creatine kinase responses in professional rugby union players." BMC sports science, medicine and rehabilitation **6**(1): 38.

Jones, T. W., K. Keane, A. Smith, J. Dent, K. McShane, T. Payne, L. Williams, P. Maguire, S. J. Marshall and P. Graham-Smith (2019). "Which anthropometric and lower body power variables are predictive of professional and amateur playing status in male rugby union players?" International Journal of Sports Science & Coaching **14**(1): 82-90.

Kempton, T., A. C. Sirotic and A. J. Coutts (2015). "An integrated analysis of match-related fatigue in professional rugby league." Journal of Sports Sciences **33**(1): 39-47.

King, N., A. Hills and J. Blundell (2005). "High Body Mass Index is not a barrier to physical activity: Analysis of international rugby players' anthropometric data." European journal of sport science **5**(2): 73-75.

Kobal, R., F. Y. Nakamura, J. E. Moraes, M. Coelho, K. Kitamura, C. C. Cal Abad, L. A. Pereira and I. Loturco (2016). "Physical performance of Brazilian rugby players from different age categories and competitive levels." Journal of Strength and Conditioning Research **30**(9): 2433-2439.

Krustrup, P., M. Mohr, T. Amstrup, T. Rysgaard, J. Johansen, A. Steensberg, P. K. Pedersen and J. Bangsbo (2003). "The yo-yo intermittent recovery test: physiological response, reliability, and validity." Medicine & Science in Sports & Exercise **35**(4): 697-705.

Lacome, M., C. Carling, J.-P. Hager, G. Dine and J. Piscione (2018). "Workload, fatigue, and muscle damage in an under-20 rugby union team over an intensified international tournament." International journal of sports physiology and performance **13**(8): 1059-1066.

Lacome, M., A. Peeters, M. Bertrand, B. Marrier, C. Carling and J. Piscione (2019). "Can we use GPS for assessing sprinting performance in rugby sevens? A concurrent validity and between-device reliability study." Biology of Sport **36**(1): 25-29.

Lacome, M., J. Piscione, J.-P. Hager and M. Bourdin (2014). "A new approach to quantifying physical demand in rugby union." Journal of Sports Sciences **32**(3): 290-300.

Lacome, M., J. Piscione, J. P. Hager and C. Carling (2017). "Fluctuations in running and skill-related performance in elite rugby union match-play." Eur J Sport Sci **17**(2): 132-143.

Larsson, P. (2003). "Global positioning system and sport-specific testing." Sports Medicine **33**(15): 1093-1101.

Leger, L. and R. Boucher (1980). "An indirect continuous running multistage field test: the Universite de Montreal track test." Can. J. Appl. Sport. Sci **5**: 77-84.

Leger, L. A. and J. Lambert (1982). "A maximal multistage 20-m shuttle run test to predict VO₂max." European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology **49**(1): 1-12.

LeSuer, D. A., J. H. McCormick, J. L. Mayhew, R. L. Wasserstein and M. D. Arnold (1997). "The accuracy of prediction equations for estimating 1-RM performance in the bench press, squat, and deadlift." Journal of Strength and Conditioning Research **11**: 211-213.

Lindsay, A., N. Draper, J. Lewis, S. P. Gieseg and N. Gill (2015a). "Positional demands of professional rugby." European journal of sport science **15**(6): 480-487.

Lindsay, A., J. Lewis, C. Scarrott, N. Draper and S. P. Gieseg (2015b). "Changes in acute biochemical markers of inflammatory and structural stress in rugby union." Journal of Sports Sciences **33**(9): 882-891.

Linke, D., D. Link and M. Lames (2020). "Football-specific validity of TRACAB's optical video tracking systems." PloS one **15**(3): e0230179.

Liu, H., W. Hopkins, A. M. Gómez and S. J. Molinuevo (2013). "Inter-operator reliability of live football match statistics from OPTA Sportsdata." International Journal of Performance Analysis in Sport **13**(3): 803-821.

Lloyd, R. S., J. B. Cronin, A. D. Faigenbaum, G. G. Haff, R. Howard, W. J. Kraemer, L. J. Micheli, G. D. Myer and J. L. Oliver (2016). "National Strength and Conditioning Association position statement on long-term athletic development." Journal of Strength and Conditioning Research **30**(6): 1491-1509.

Lombard, W. P., J. J. Durandt, H. Masimla, M. Green and M. I. Lambert (2015). "Changes in body size and physical characteristics of South African under-20 rugby union players over a 13-year period." The Journal of Strength & Conditioning Research **29**(4): 980-988.

Lovell, R. and G. Abt (2013). "Individualization of time–motion analysis: a case-cohort example." International journal of sports physiology and performance **8**(4): 456-458.

Lu, W., S. Boyas, M. Jubeau and A. Rahmani (2019). "Reliability of force-velocity relationships during deadlift high pull." Sports Biomechanics **18**(3): 277-288.

MacLeod, S. J., C. Hagan, M. Egaña, J. Davis and D. Drake (2018). "The use of microtechnology to monitor collision performance in professional rugby union." International journal of sports physiology and performance **13**(8): 1075-1082.

Main, L. C., B. Dawson, K. Heel, J. R. Grove, G. J. Landers and C. Goodman (2010). "Relationship between inflammatory cytokines and self-report measures of training overload." Research in Sports Medicine **18**(2): 127-139.

Malone, J. J., R. Lovell, M. C. Varley and A. J. Coutts (2017). "Unpacking the Black Box: Applications and Considerations for Using GPS Devices in Sport." International Journal of Sports Physiology and Performance **12**(Suppl 2): S218-S226.

Marcora, S. M., W. Staiano and V. Manning (2009). "Mental fatigue impairs physical performance in humans." Journal of Applied Physiology.

Mathieu, B., A. Peeters, J. Piscione and M. Lacombe (2016). Reliability of counter-movement jump performance, cycle ergometer sprint performance and creatine kinase concentration in team sport athletes: interest for fatigue monitoring. Book of Abstracts. 21st Annual Congress of the European College of Sports Science. Vienna, Austria: European College of Sport Science.

Maud, P. (1983). "Physiological and anthropometric parameters that describe a rugby union team." British journal of sports medicine **17**(1): 16-23.

McLean, B. D., A. J. Coutts, V. Kelly, M. R. McGuigan and S. J. Cormack (2010). "Neuromuscular, endocrine, and perceptual fatigue responses during different length between-match microcycles in professional rugby league players." International journal of sports physiology and performance **5**(3): 367-383.

McLellan, C. P. and D. I. Lovell (2012). "Neuromuscular responses to impact and collision during elite rugby league match play." The Journal of Strength & Conditioning Research **26**(5): 1431-1440.

McLellan, C. P., D. I. Lovell and G. C. Gass (2010). "Creatine kinase and endocrine responses of elite players pre, during, and post rugby league match play." The Journal of Strength & Conditioning Research **24**(11): 2908-2919.

McLellan, C. P., D. I. Lovell and G. C. Gass (2011a). "Biochemical and endocrine responses to impact and collision during elite rugby league match play." The Journal of Strength & Conditioning Research **25**(6): 1553-1562.

McLellan, C. P., D. I. Lovell and G. C. Gass (2011b). "Markers of postmatch fatigue in professional rugby league players." The Journal of Strength & Conditioning Research **25**(4): 1030-1039.

McNair, D. M., M. Lorr and L. F. Droppleman (1971). "Manual profile of mood states."

Meeusen, R., M. Duclos, C. Foster, A. Fry, M. Gleeson, D. Nieman, J. Raglin, G. Rietjens, J. Steinacker and A. Urhausen (2013). "Prevention, diagnosis and treatment of the overtraining syndrome: Joint consensus statement of the European College of Sport Science (ECSS) and the American College of Sports Medicine (ACSM)." European journal of sport science **13**(1): 1-24.

Monod, H. and R. Flandrois (2003). Physiologie Du Sport - Bases Physiologiques Des Activités Physiques Et Sportives.

Montgomery, P. G. and W. G. Hopkins (2013). "The effects of game and training loads on perceptual responses of muscle soreness in Australian football." International journal of sports physiology and performance **8**(3): 312-318.

Morgan, W., D. Brown, J. Raglin, P. O'connor and K. Ellickson (1987). "Psychological monitoring of overtraining and staleness." British journal of sports medicine **21**(3): 107-114.

Nicolella, D. P., L. Torres-Ronda, K. J. Saylor and X. Schelling (2018). "Validity and reliability of an accelerometer-based player tracking device." PloS one **13**(2): e0191823.

Nunes, R. F. H., R. Duffield, F. Y. Nakamura, E. d. S. Bezerra, R. L. Sakugawa, I. Loturco, F. Bobinski, D. F. Martins and L. G. A. Guglielmo (2019). "Recovery following Rugby Union matches: effects of cold water immersion on markers of fatigue and damage." Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism **44**(5): 546-556.

O'Gorman, D., A. Hunter, C. McDonnacha and J. P. Kirwan (2000). "Validity of field tests for evaluating endurance capacity in competitive and international-level sports participants." The Journal of Strength & Conditioning Research **14**(1): 62-67.

Olds, T. (2001). "The evolution of physique in male rugby union players in the twentieth century." Journal of Sports Sciences **19**(4): 253-262.

Owen, C., K. Till, P. Phibbs, D. J. Read, J. Weakley, M. Atkinson, M. Cross, S. Kemp, T. Sawczuk and K. Stokes (2022). "A multidimensional approach to identifying the physical

qualities of male English regional academy rugby union players; considerations of position, chronological age, relative age and maturation." European journal of sport science: 1-11.

Owen, C., K. Till, J. Weakley and B. Jones (2020). "Testing methods and physical qualities of male age grade rugby union players: A systematic review." PloS one **15**(6): e0233796.

Owen, S. M. (2019). Match-play demands of a Super Rugby team, Stellenbosch: Stellenbosch University.

Owen, S. M., R. E. Venter, S. Du Toit and W. J. Kraak (2015). "Acceleratory match-play demands of a Super Rugby team over a competitive season." Journal of Sports Sciences **33**(19): 2061-2069.

Peeters, A., C. Carling, J. Piscione and M. Lacomme (2019). "In-Match Physical Performance Fluctuations in International Rugby Sevens Competition." Journal of sports science & medicine **18**(3): 419-426.

Peeters, A., J. Piscione, M. Lacomme, C. Carling and N. Babault (2022). "A comparison of running and contact loads in U18 and U20 international rugby union competition." Biology of Sport **40**(1): 149-160.

Phibbs, P. J., B. Jones, D. B. Read, G. A. Roe, J. Darrall-Jones, J. J. Weakley, A. Rock and K. Till (2018a). "The appropriateness of training exposures for match-play preparation in adolescent schoolboy and academy rugby union players." Journal of Sports Sciences **36**(6): 704-709.

Phibbs, P. J., B. Jones, G. Roe, D. B. Read, J. Darrall-Jones, J. Weakley, A. Rock and K. Till (2018b). "Organized chaos in late specialization team sports: weekly training loads of elite adolescent rugby union players." The Journal of Strength & Conditioning Research **32**(5): 1316-1323.

Phibbs, P. J., B. Jones, G. A. Roe, D. B. Read, J. Darrall-Jones, J. J. Weakley and K. Till (2017). "We know they train, but what do they do? Implications for coaches working with adolescent rugby union players." International Journal of Sports Science & Coaching **12**(2): 175-182.

Phillips, K. and A. Matheny (1990). "Quantitative genetic analysis of longitudinal trends in height: preliminary results from the Louisville Twin Study." Acta geneticae medicae et gemellologiae: twin research **39**(2): 143-163.

Place, N. and G. Y. Millet (2020). "Quantification of neuromuscular fatigue: what do we do wrong and why?" Sports Medicine **50**(3): 439-447.

Pollard, B. T., A. N. Turner, R. Eager, D. J. Cunningham, C. J. Cook, P. Hogben and L. P. Kilduff (2018). "The ball in play demands of international rugby union." Journal of Science and Medicine in Sport **21**(10): 1090-1094.

Posthumus, L., C. Macgregor, P. Winwood, K. Darry, M. Driller and N. Gill (2020). "Physical and fitness characteristics of elite professional rugby union players." Sports **8**(6): 85.

Quarrie, K., P. Handcock, M. Toomey and A. E. Waller (1996). "The New Zealand rugby injury and performance project. IV. Anthropometric and physical performance comparisons between positional categories of senior A rugby players." British journal of sports medicine **30**(1): 53-56.

Quarrie, K., P. Handcock, A. E. Waller, D. Chalmers, M. Toomey and B. Wilson (1995). "The New Zealand rugby injury and performance project. III. Anthropometric and physical performance characteristics of players." British journal of sports medicine **29**(4): 263-270.

Quarrie, K. and B. Wilson (2000). "Force production in the rugby union scrum." Journal of Sports Sciences **18**(4): 237-246.

Quarrie, K. L. and W. 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.

Quarrie, K. L., W. G. Hopkins, M. J. Anthony and N. D. Gill (2013). "Positional demands of international rugby union: Evaluation of player actions and movements." Journal of Science and Medicine in Sport **16**(4): 353-359.

Ramírez-López, C., K. Till, A. Boyd, M. Bennet, J. Piscione, S. Bradley, P. Giuliano, C. Leduc and B. Jones (2020a). "Coopetition: cooperation among competitors to enhance applied research and drive innovation in elite sport." British journal of sports medicine.

Ramírez-López, C., K. Till, T. Sawczuk, P. Giuliano, A. Peeters, G. Beasley, F. Murray, S. Pledger, D. Read and B. Jones (2020b). "A multi-nation examination of the fatigue and recovery time course during the inaugural Under-18 Six Nations rugby union competition." Journal of Sports Sciences **38**(6): 644-651.

Ramsbottom, R., J. Brewer and C. Williams (1988). "A progressive shuttle run test to estimate maximal oxygen uptake." British journal of sports medicine **22**(4): 141-144.

Read, D., D. Weaving, P. Phibbs, J. Darrall-Jones, G. Roe, J. Weakley, S. Hendricks, K. Till and B. Jones (2017a). "Movement and physical demands of school and university rugby union match-play in England." BMJ Open Sport & Exercise Medicine **2**(1): e000147.

Read, D. B., B. Jones, P. J. Phibbs, G. A. Roe, J. Darrall-Jones, J. J. Weakley and K. Till (2018a). "The physical characteristics of match-play in English schoolboy and academy rugby union." Journal of Sports Sciences **36**(6): 645-650.

Read, D. B., B. Jones, P. J. Phibbs, G. A. Roe, J. D. Darrall-Jones, J. J. Weakley and K. Till (2017b). "Physical demands of representative match-play in adolescent rugby union." The Journal of Strength & Conditioning Research **31**(5): 1290-1296.

Read, D. B., B. Jones, S. Williams, P. J. Phibbs, J. D. Darrall-Jones, G. A. Roe, J. J. Weakley, A. Rock and K. Till (2018b). "The physical characteristics of specific phases of play during rugby union match play." International journal of sports physiology and performance **13**(10): 1331-1336.

Read, D. B., K. Till, G. Beasley, M. Clarkson, R. Heyworth, J. Lee, J. J. Weakley, P. J. Phibbs, G. A. Roe and J. Darrall-Jones (2019). "Maximum running intensities during English academy rugby union match-play." Science and Medicine in Football **3**(1): 43-49.

Reardon, C., D. P. Tobin and E. Delahunt (2015). "Application of individualized speed thresholds to interpret position specific running demands in elite professional rugby union: a GPS study." PloS one **10**(7): e0133410.

Reardon, C., D. P. Tobin, P. Tierney and E. Delahunt (2017a). "Collision count in rugby union: a comparison of micro-technology and video analysis methods." Journal of Sports Sciences **35**(20): 2028-2034.

Reardon, C., D. P. Tobin, P. Tierney and E. Delahunt (2017b). "The worst case scenario: Locomotor and collision demands of the longest periods of gameplay in professional rugby union." PloS one **12**(5): e0177072.

Reid, R. and C. Williams (1974). "A concept of fitness and its measurement in relation to rugby football." British journal of sports medicine **8**(2-3): 96.

Reilly, T. (1976). "A motion analysis of work-rate in different positional roles in professional football match-play." J Human Movement Studies **2**: 87-97.

Rigg, P. and T. Reilly (1988). "A fitness profile and anthropometric analysis of first and second class rugby union players." Science and football: 194-200.

Roberts, S. P., G. Trewartha, R. J. Higgitt, J. El-Abd and K. A. Stokes (2008). "The physical demands of elite English rugby union." Journal of Sports Sciences **26**(8): 825-833.

Roe, G. (2017). Monitoring Training and Match-Induced Fatigue in Academy Rugby Union Players, Leeds Beckett University. **Doctor of Philosophy**.

Roe, G., J. Darrall-Jones, K. Till, P. Phibbs, D. Read, J. Weakley and B. Jones (2016a). "Between-days reliability and sensitivity of common fatigue measures in rugby players." International journal of sports physiology and performance **11**(5): 581-586.

Roe, G., J. Darrall-Jones, K. Till, P. Phibbs, D. Read, J. Weakley and B. Jones (2017a). "To jump or cycle? Monitoring neuromuscular function in rugby union players." International journal of sports physiology and performance **12**(5): 690-696.

Roe, G., J. Darrall-Jones, K. Till, P. Phibbs, D. Read, J. Weakley, A. Rock and B. Jones (2017b). "The effect of physical contact on changes in fatigue markers following rugby union field-based training." European journal of sport science **17**(6): 647-655.

Roe, G., M. Halkier, C. Beggs, K. Till and B. Jones (2016b). "The use of accelerometers to quantify collisions and running demands of rugby union match-play." International Journal of Performance Analysis in Sport **16**(2): 590-601.

Roe, G., K. Till, J. Darrall-Jones, P. Phibbs, J. Weakley, D. Read and B. Jones (2016c). "Changes in markers of fatigue following a competitive match in elite academy rugby union players." South African Journal of Sports Medicine **28**(1): 2-5.

Ross, A., N. Gill, J. Cronin and R. Malcata (2015). "The relationship between physical characteristics and match performance in rugby sevens." European journal of sport science **15**(6): 565-571.

Russell, M., D. J. West, M. A. Briggs, R. M. Bracken, C. J. Cook, T. Giroud, N. Gill and L. P. Kilduff (2015). "A passive heat maintenance strategy implemented during a simulated half-time improves lower body power output and repeated sprint ability in professional rugby union players." PloS one **10**(3): e0119374.

Russell, S., D. Jenkins, S. Rynne, S. L. Halson and V. Kelly (2019a). "What is mental fatigue in elite sport? Perceptions from athletes and staff." European journal of sport science **19**(10): 1367-1376.

Russell, S., D. Jenkins, M. Smith, S. Halson and V. Kelly (2019b). "The application of mental fatigue research to elite team sport performance: New perspectives." Journal of Science and Medicine in Sport **22**(6): 723-728.

Samozino, P., G. Rabita, S. Dorel, J. Slawinski, N. Peyrot, E. Saez de Villarreal and J. B. Morin (2016). "A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running." Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports **26**(6): 648-658.

Sant'anna, R. T. and F. A. de Souza Castro (2016). "Aerobic power and field test results of amateur 15-a-side rugby union players." The Journal of sports medicine and physical fitness **57**(12): 1605-1612.

Scott, A. C., N. Roe, A. J. Coats and M. F. Piepoli (2003). "Aerobic exercise physiology in a professional rugby union team." International Journal of Cardiology **87**(2-3): 173-177.

Sedeaud, A., A. Marc, J. Schipman, M. Tafflet, J.-P. Hager and J.-F. Toussaint (2012). "How they won Rugby World Cup through height, mass and collective experience." British journal of sports medicine **46**(8): 580-584.

Sedeaud, A., H. Vidalin, M. Tafflet, A. Marc and J.-F. Toussaint (2013). "Rugby morphologies: "bigger and taller", reflects an early directional selection." J Sports Med Phys Fitness **53**(2): 185-191.

Shearer, D. A., L. P. Kilduff, C. Finn, R. M. Jones, R. M. Bracken, S. D. Mellalieu, N. Owen, B. T. Crewther and C. J. Cook (2015). "Measuring recovery in elite rugby players: the brief assessment of mood, endocrine changes, and power." Research Quarterly for Exercise and Sport **86**(4): 379-386.

Shearer, D. A., W. Sparkes, J. Northeast, D. J. Cunningham, C. J. Cook and L. P. Kilduff (2017). "Measuring recovery: an adapted Brief Assessment of Mood (BAM+) compared to biochemical and power output alterations." Journal of Science and Medicine in Sport **20**(5): 512-517.

Sirotic, A. C., A. J. Coutts, H. Knowles and C. Catterick (2009). "A comparison of match demands between elite and semi-elite rugby league competition." Journal of Sports Sciences **27**(3): 203-211.

Smart, D., N. D. Gill, C. M. Beaven, C. Cook and A. Blazeovich (2008). "The relationship between changes in interstitial creatine kinase and game-related impacts in rugby union." British journal of sports medicine **42**(3): 198-201.

Smart, D., W. G. Hopkins, K. L. Quarrie and N. Gill (2014). "The relationship between physical fitness and game behaviours in rugby union players." European journal of sport science **14**(sup1): S8-S17.

Smart, D. J. and N. D. Gill (2013). "Effects of an off-season conditioning program on the physical characteristics of adolescent rugby union players." The Journal of Strength & Conditioning Research **27**(3): 708-717.

Smart, D. J., W. G. Hopkins and N. D. Gill (2013). "Differences and changes in the physical characteristics of professional and amateur rugby union players." The Journal of Strength & Conditioning Research **27**(11): 3033-3044.

St Clair Gibson, A., J. Swart and R. Tucker (2018). "The interaction of psychological and physiological homeostatic drives and role of general control principles in the regulation of

physiological systems, exercise and the fatigue process–The Integrative Governor theory." European journal of sport science **18**(1): 25-36.

Stoop, R., E. Hohenauer, A. M. L. Rucker and R. Clijsen (2019). "Anthropometric properties versus physical performance in rugby union forwards and backs-A systematic review." Annals of Applied Sport Science **6**(2): 1-13.

Suárez-Arrones, L. J., L. J. Portillo, J. M. González-Ravé, V. E. Muñoz and F. Sanchez (2012). "Match running performance in Spanish elite male rugby union using global positioning system." Isokinetics and Exercise Science **20**(2): 77-83.

Swaby, R., P. A. Jones and P. Comfort (2016). "Relationship between maximum aerobic speed performance and distance covered in rugby union games." The Journal of Strength & Conditioning Research **30**(10): 2788-2793.

Takarada, Y. (2003). "Evaluation of muscle damage after a rugby match with special reference to tackle plays." British journal of sports medicine **37**(5): 416-419.

Tavares, F., T. B. Smith and M. Driller (2017). "Fatigue and recovery in rugby: a review." Sports Medicine **47**(8): 1515-1530.

Taylor, K.-L. (2012). "Monitoring neuromuscular fatigue in high performance athletes."

Taylor, K.-L., J. Cronin, N. D. Gill, D. W. Chapman and J. Sheppard (2010). "Sources of variability in iso-inertial jump assessments." International journal of sports physiology and performance **5**(4): 546-558.

Taylor, K., D. Chapman, J. Cronin, M. J. Newton and N. Gill (2012). "Fatigue monitoring in high performance sport: a survey of current trends." J Aust Strength Cond **20**(1): 12-23.

Tee, J. and Y. Coopoo (2015). "Movement and impact characteristics of South African professional rugby union players." South African Journal of Sports Medicine **27**(2): 33-39.

Tierney, P., C. Blake and E. Delahunt (2020). "The relationship between collision metrics from micro-sensor technology and video-coded events in rugby union." Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports **30**(11): 2193-2204.

Tierney, P., C. Blake and E. Delahunt (2021). "Physical characteristics of different professional rugby union competition levels." Journal of Science and Medicine in Sport **24**(12): 1267-1271.

Tierney, P., D. Tobin, C. Blake and E. Delahunt (2017). "Attacking 22 entries in rugby union: running demands and differences between successful and unsuccessful entries." Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports **27**(12): 1934-1941.

Till, K., S. Cobley, J. O'Hara, C. Chapman and C. Cooke (2013). "An individualized longitudinal approach to monitoring the dynamics of growth and fitness development in adolescent athletes." The Journal of Strength & Conditioning Research **27**(5): 1313-1321.

Till, K., B. L. Jones, S. Cobley, D. Morley, J. O'Hara, C. Chapman, C. Cooke and C. B. Beggs (2016). "Identifying talent in youth sport: a novel methodology using higher-dimensional analysis." PloS one **11**(5): e0155047.

Till, K., J. Weakley, D. B. Read, P. Phibbs, J. Darrall-Jones, G. Roe, S. Chantler, S. Mellalieu, M. Hislop and K. Stokes (2020). "Applied Sport Science for Male Age-Grade Rugby Union in England." Sports Medicine-Open **6**(1): 1-20.

Twist, C. and J. Highton (2013). "Monitoring fatigue and recovery in rugby league players." International journal of sports physiology and performance **8**(5): 467-474.

Twist, C., J. Highton, M. Daniels, N. Mill and G. Close (2017). "Player responses to match and training demands during an intensified fixture schedule in professional rugby league: a case study." International journal of sports physiology and performance **12**(8): 1093-1099.

Twist, C., M. Waldron, J. Highton, D. Burt and M. Daniels (2012). "Neuromuscular, biochemical and perceptual post-match fatigue in professional rugby league forwards and backs." Journal of Sports Sciences **30**(4): 359-367.

Van der Linden, D., M. Frese and T. F. Meijman (2003). "Mental fatigue and the control of cognitive processes: effects on perseveration and planning." Acta Psychologica **113**(1): 45-65.

Vänttinen, T., M. Blomqvist, K. Nyman and K. Häkkinen (2011). "Changes in body composition, hormonal status, and physical fitness in 11-, 13-, and 15-year-old Finnish regional youth soccer players during a two-year follow-up." The Journal of Strength & Conditioning Research **25**(12): 3342-3351.

Varley, M. C., G. P. Elias and R. J. Aughey (2012a). "Current match-analysis techniques' underestimation of intense periods of high-velocity running." International journal of sports physiology and performance **7**(2): 183-185.

Varley, M. C., I. H. Fairweather and Aughey¹, Robert J (2012b). "Validity and reliability of GPS for measuring instantaneous velocity during acceleration, deceleration, and constant motion." Journal of Sports Sciences **30**(2): 121-127.

Vaz, L., T. Morais, H. Rocha and N. James (2014). "Fitness profiles of elite Portuguese rugby union players." Journal of human kinetics **41**: 235.

Vaz, L., I. Vasilica, D. Carreras, W. Kraak and F. Y. Nakamura (2015). "Physical fitness profiles of elite under-19 rugby union players." J Sports Med Phys Fitness **56**(4): 415-421.

Vøllestad, N. K. (1997). "Measurement of human muscle fatigue." Journal of Neuroscience Methods **74**(2): 219-227.

Wang, R., J. R. Hoffman, S. Tanigawa, A. A. Miramonti, M. B. La Monica, K. S. Beyer, D. D. Church, D. H. Fukuda and J. 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): 3051-3056.

Weakley, J., K. Till, J. Sampson, H. Banyard, C. Leduc, K. Wilson, G. Roe and B. Jones (2019a). "The effects of augmented feedback on sprint, jump, and strength adaptations in rugby union players after a 4-week training program." International journal of sports physiology and performance **14**(9): 1205-1211.

Weakley, J. J., K. Till, J. Darrall-Jones, G. A. Roe, P. J. Phibbs, D. B. Read and B. L. Jones (2017). "The influence of resistance training experience on the between-day reliability of commonly used strength measures in male youth athletes." The Journal of Strength & Conditioning Research **31**(7): 2005-2010.

Weakley, J. J., K. Till, J. Darrall-Jones, G. A. Roe, P. J. Phibbs, D. B. Read and B. L. Jones (2019b). "Strength and conditioning practices in adolescent rugby players: Relationship with changes in physical qualities." The Journal of Strength & Conditioning Research **33**(9): 2361-2369.

West, D. J., C. V. Finn, D. J. Cunningham, D. A. Shearer, M. R. Jones, B. J. Harrington, B. T. Crewther, C. J. Cook and L. P. Kilduff (2014). "Neuromuscular function, hormonal, and mood responses to a professional rugby union match." The Journal of Strength & Conditioning Research **28**(1): 194-200.

Whitehead, S., K. Till, D. Weaving and B. Jones (2018). "The use of microtechnology to quantify the peak match demands of the football codes: a systematic review." Sports Medicine **48**(11): 2549-2575.

Winter, E. M., G. A. Abt and A. M. Nevill (2014). *Metrics of meaningfulness as opposed to sleights of significance*, Routledge.

Wood, D. J., G. F. Coughlan and E. Delahunt (2018). "Fitness profiles of elite adolescent Irish rugby union players." The Journal of Strength & Conditioning Research **32**(1): 105-112.

WorldRugby (2019). "SIX NATIONS 2019 Statistical report - Game analysis."

Yamamoto, H., M. Takemura, J. Iguchi, M. Tachibana, J. Tsujita and T. Hojo (2020). "In-match physical demands on elite Japanese rugby union players using a global positioning system." BMJ Open Sport & Exercise Medicine **6**(1): e000659.

Zemski, A. J., G. J. Slater and E. M. Broad (2015). "Body composition characteristics of elite Australian rugby union athletes according to playing position and ethnicity." Journal of Sports Sciences **33**(9): 970-978.