



HAL
open science

**Analyse de la tâche et physiologie appliquée au rugby :
Etude de la fatigue associée à l'exercice maximal
isométrique répété**

Mathieu Lacome

► **To cite this version:**

Mathieu Lacome. Analyse de la tâche et physiologie appliquée au rugby : Etude de la fatigue associée à l'exercice maximal isométrique répété. Biomechanics [physics.med-ph]. UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1, 2013. English. NNT: . tel-00912834

HAL Id: tel-00912834

<https://theses.hal.science/tel-00912834>

Submitted on 2 Dec 2013

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.

N° d'ordre : 72 – 2013

Année 2013

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON

Délivrée par

L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1
ECOLE DOCTORALE MEGA

DIPLOME DE DOCTORAT
(Arrêté du 7 août 2006)

Présentée par

Mathieu LACOME

Soutenue le 16 Mai 2013

Analyse de la tâche et physiologie appliquée au rugby

Etude de la fatigue associée à l'exercice maximal isométrique répété

JURY

Docteur Muriel BOURDIN (Directrice de thèse, Université Lyon 1)

Professeur Laurent ARSAC (Rapporteur, Université Bordeaux 2)

Professeur Stéphane PERREY (Rapporteur, Université Montpellier 1)

Professeur Jean-René LACOUR (Université Lyon 1)

Professeur Xavier BIGARD (Agence Française de Lutte Antidopage).

Docteur Martin BUCHHEIT (ASPIRE Academy, Qatar)

Docteur Julien PISCIONE (Fédération Française de Rugby).

Docteur Jean-Philippe HAGER (Centre Orthopédique Santy, Lyon ; Fédération Française de Rugby).

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1

Président de l'Université	M. François-Noël GILLY
Vice-président du Conseil d'Administration	M. le Professeur Hamda BEN HADID
Vice-président du Conseil des Etudes et de la Vie Universitaire	M. le Professeur Philippe LALLE
Vice-président du Conseil Scientifique	M. le Professeur Germain GILLET
Secrétaire Général	M. Alain HELLEU

COMPOSANTES SANTE

Faculté de Médecine Lyon Est – Claude Bernard	Directeur : M. le Professeur J. ETIENNE
Faculté de Médecine et de Maïeutique Lyon Sud – Charles Mérieux	Administrateur provisoire : M. le Professeur G. KIRKORIAN
UFR d'Odontologie	Directeur : M. le Professeur D. BOURGEOIS
Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques	Directeur : Mme la Professeure C. VINCI-GUERRA.
Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation	Directeur : M. le Professeur Y. MATILLON
Département de formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine	Directeur : M. le Professeur P. FARGE

COMPOSANTES ET DEPARTEMENTS DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Faculté des Sciences et Technologies	Directeur : M. le Professeur F. De MARCHI
Département Biologie	Directeur : M. le Professeur F. FLEURY
Département Chimie Biochimie	Directeur : Mme le Professeur H. PARROT
Département GEP	Directeur : M. N. SIAUVE
Département Informatique	Directeur : M. le Professeur S. AKKOUCHE
Département Mathématiques	Directeur : M. le Professeur A. GOLDMAN
Département Mécanique	Directeur : M. le Professeur H. BEN HADID
Département Physique	Directeur : Mme S. FLECK
Département Sciences de la Terre	Directeur : Mme la Professeure I. DANIEL
UFR Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives	Directeur : M. C. COLLIGNON
Observatoire de Lyon	Directeur : M. B. GUIDERDONI
Polytech Lyon	Directeur : M. P. FOURNIER
Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique	Directeur : M. G. PIGNAULT
Institut Universitaire de Technologie de Lyon 1	Directeur : M. C. VITON
Institut Universitaire de Formation des Maîtres	Directeur : M. R. BERNARD
Institut de Science Financière et d'Assurances	Directeur : Mme la Professeure V. MAUME-DES-CHAMPS

À ma mère,

Table des matières

LISTE DES ABRÉVIATIONS	7
INTRODUCTION	6
REVUE DE LA LITTERATURE	10
1. EXIGENCES PHYSIQUES DU RUGBY MODERNE	11
1.1 Méthodes d'analyse vidéographiques	12
1.1.1 L'analyse par notation.	12
1.1.2 Les méthodes de suivi semi-automatique.	13
1.2 L'outil GPS.	15
2. ANALYSE DE L'ACTIVITE LORS DE COMPETITION DE RUGBY A XV	16
2.1 Distance totale parcourue	17
2.2 Analyse par catégories d'intensité.	18
2.3 Limites des méthodologies actuelles et objectifs de l'étude 1	20
3. FATIGUE ET EXERCICE INTERMITTENT	23
3.1 Fatigue et exercice intermittent dynamique	24
3.1.1 Facteurs métaboliques	25
3.1.2 Facteurs nerveux	29
3.2 Facteurs physiologiques associés à l'aptitude à répéter des sprints	32
3.3 Fatigue et exercice intermittent statique	38
3.3.1 Cas particulier de la contraction isométrique	39

3.3.1.1	Coût énergétique de la contraction isométrique	39
3.3.1.2	Fatigue et exercice isométrique	39
3.3.2	Objectifs de l'étude 2	42
ÉTUDE 1		44
UNE NOUVELLE APPROCHE D'ANALYSE DE L'ACTIVITE EN RUGBY A XV.		44
1.	OBJECTIFS DE CETTE ETUDE.	45
2.	MATERIEL ET METHODES	45
2.1	Sujets.	45
2.2	Protocole expérimental.	46
2.3	Evaluation physiologique de terrain.	46
2.4	Analyse des données vidéo.	47
2.5	Calculs	48
2.6	Analyses statistiques	49
3.	RESULTATS	50
3.1	Caractéristiques anthropométrique et physiologique.	50
3.2	Temps total de travail et distance parcourue.	50
3.3	Ratios Travail:Récupération (T:R)	50
3.4	Les accélérations	51
3.5	Comparaison des Mi-Temps 1 et Mi-Temps 2.	54
4.	DISCUSSION.	56
5.	CONCLUSION.	61
ÉTUDE 2		62
FATIGUE ET REPETITION D'EFFORTS MAXIMAUX ISOMETRIQUE.		62
1.	OBJECTIFS DE L'ETUDE.	63
2.	MATERIEL ET METHODES	63

2.1	Caractéristiques des joueurs.	63
2.2	Protocole	63
2.3	Systèmes de mesure	66
2.4	Calcul et traitement des données	69
2.1	Analyses statistiques	72
3.	RESULTATS.	72
3.1	Reproductibilité	72
3.2	Effectif de l'analyse	73
3.3	Mesures de force.	73
3.4	Mesures du signal EMG.	74
3.5	Consommation d'oxygène, Quotient respiratoire (QR), Fc et Lactate sanguin.	76
3.6	Oxygénation musculaire.	78
3.7	Relation entre les variables.	80
4.	DISCUSSION	82
4.1	Méthodes	82
4.2	Caractéristiques anthropométrique et physiologique	83
4.3	Diminution de la force	84
4.4	Fatigue et EMG	86
4.5	Fatigue et facteurs métaboliques	88
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	92
	APPLICATIONS PRATIQUES	95
	BIBLIOGRAPHIE	97
	ANNEXES	115

LISTE DES ABRÉVIATIONS

- Av** : Avants. Groupe de poste comprenant les piliers, le talon, les 2ème et 3ème ligne.
- Ar** : Arrières. Groupe de poste comprenant le demi de mêlée, le demi d'ouverture, les centres, les ailiers et l'arrière.
- P2L** : Groupe de poste comprenant les deux piliers ainsi que les deux 2ème ligne.
- T3L** : Groupe de poste comprenant le talon et les trois 3ème ligne.
- Centres** : Groupe de poste comprenant le demi d'ouverture et les deux centres.
- AIAr** : Groupe de poste comprenant les deux ailiers et l'arrière.
- MT1, MT2** : Mi temps 1 et Mi temps 2, respectivement.
- MI** : Moyenne intensité.
- >VMA** : Vitesse de course supramaximale, supérieure à VMA
- T** : Travail. Vitesse dont l'intensité est supérieure à VLa4.
- R** : Récupération. Vitesse dont l'intensité est inférieure à VLa4.
- Ratio T:R** : Rapport entre le temps de travail et le temps de récupération.
- ³¹P-NMR** : Résonance magnétique au Phosphate 31 (Phosphorus-31 Nuclear magnetic resonance).
- NIRS** : Spectroscopie dans le proche infra-rouge (Near Infra-red spectroscopy).
- GPS** : Global Positioning System.
- Fc** : Fréquence cardiaque (battements.min⁻¹).
- Fc max** : Fréquence cardiaque maximale (battements.min⁻¹).
- Fc moy** : Fréquence cardiaque moyenne (battement.min⁻¹).
- Fc pic** : Fréquence cardiaque pic (battement.min⁻¹)
- $\dot{V}O_2$** : Débit de consommation d'oxygène (l.min⁻¹ ou ml.kg⁻¹.min⁻¹).
- $\dot{V}O_{2max}$** : Débit maximal de consommation d'oxygène ((l.min⁻¹ ou ml.kg⁻¹.min⁻¹).
- QR** : Quotient respiratoire.
- QR₁₁₋₁₂** : Quotient respiratoire observé à l'état stable, sur les répétitions 11 et 12 du test de répétition d'efforts statiques maximaux.
- PMA** : Puissance maximale aérobie (W).
- VMA** : Vitesse maximale aérobie (km.h⁻¹).
- [La]_s** : Concentration de lactate dans le sang.
- [La]_{s pic}** : Concentration de lactate pic dans le muscle.
- [La]_m** : Concentration de lactate dans le muscle.
- [PCr]** : Concentration en Phosphocréatine.
- VLa4** : Vitesse correspondant à une concentration en lactate sanguin de 4 mmol.l⁻¹ (km.h⁻¹).
- VLa4%** : Vitesse correspondant à une concentration en lactate sanguin de 4 mmol.l⁻¹ (en % de VMA).
- MG** : Masse grasse (%)
- RMS** : Root Mean Square.
- MPF** : Mean Power Frequency.
- RF** : *Rectus femoris*.
- VL** : *Vastus lateralis*.
- VM** : *Vastus medialis*.

BF : *Biceps femoris*.

UM : Unité motrice.

CMV : Contraction maximale volontaire.

F_{TOT} : Force totale résultante de la force antéro-postérieures et la force verticale.

F_x : Force antéro-postérieure.

F_z : Force verticale.

ΔForce, ΔAngle, ΔRMS, ΔMPF : Variation de la variable entre les 2 premières répétitions et les 2 dernières répétitions, exprimé en % des 2 premières répétitions.

TOI : Index de la saturation en oxygène (Total Oxygen Index).

nTHI : Index du volume de sang (Total Hémoglobin Index).

TOI_{MIN}, nTHI_{MIN} : Valeurs minimales de TOI et de nTHI observées pendant la contraction.

TTOI_{MIN} : temps auquel on atteint la valeur minimale de TOI à l'issue de chaque répétition.

ΔTOI_{CONT}, ΔnTHI_{CONT} : Différence entre la valeur de TOI ou nTHI observée en fin de placement et celle observée en fin de contraction.

ΔTOI_{RECUP}, ΔnTHI_{RECUP} : Différence entre la valeur de TOI ou nTHI observée en fin de contraction et celle observée en fin de récupération.

ΔTOI_{RECUP10s} : Différence entre la valeur de TOI observée en fin de contraction et celle observée en fin de récupération passive de 10 s, avant le placement.

ΔTOI_{PLA} : Différence entre la valeur de TOI observée en fin de récupération passive de 10 s, avant le placement et la valeur de TOI observée en fin de placement.

Introduction

Certaines études (Françaises...) affirment que l'ancêtre du rugby est la soule, sport très pratiqué en France dès le moyen âge. Néanmoins, l'histoire du rugby commence officiellement chez nos voisins anglais en 1823, avec l'initiative d'un étudiant de seize ans : William Webb Ellis, sur le terrain d'une petite ville, Rugby, située entre Oxford et Cambridge. Selon la légende lors d'un match de football, le jeune homme reçut la balle dans les mains et courut, portant ainsi la balle en avant, bravant alors la règle. Le football de Rugby était né. Les premières règles sont établies dans les années 1840 et le sport s'étend dans le Royaume Uni au cours des décennies qui suivent. Le football et le rugby n'adoptent toutefois leurs différences essentielles, entre jeu au pied et à la main, qu'en 1863. Les fédérations, de la Rugby Union à l'IRB, feront évoluer les règles du rugby vers celles que l'on suit aujourd'hui, tout en conservant l'amateurisme comme valeur essentielle du rugby à 15 jusqu'en 1995.

Les équipes furent d'abord constituées de 20 joueurs, presque tous avants. C'est dans ces empoignades épiques que le rugby a puisé ses vertus initiales : discipline, respect de l'adversaire, dépassement de soi et courage... En dépit de ces nombreuses vertus, le jeu était plutôt dur et les législateurs décidèrent de ramener le nombre de joueurs à 15. Initialement, il était conseillé au joueur plaqué de faire tout son possible pour ne pas lâcher le ballon, conduisant inévitablement à une mêlée confuse. Une règle stipulant l'obligation de lâcher le ballon fut alors introduite, afin d'encourager le jeu de passes. Ainsi, par nécessité stratégique, le nombre d'avants diminua au profit des joueurs des lignes arrières pour arriver progressivement à la configuration actuelle dans laquelle on distingue les avants (8 joueurs), les demis (2), les centres (2 joueurs), les ailiers (2) et l'arrière.

L'avènement du rugby à XV professionnel a entraîné une augmentation du nombre de rencontres et de leur intensité, rendant indispensable une préparation physique et une récupération optimales pour les joueurs professionnels. Ainsi, la recherche en physiologie appliquée au rugby s'est considérablement développée au cours des vingt dernières années. L'estimation de la charge de travail et de la sollicitation énergétique associée représente la problématique centrale de ces recherches. En effet, elle concerne des applications diverses, notamment dans l'optimisation des méthodes d'entraînements et dans la prévention des états de fatigues aigus ou chroniques, généralement associés au risque de blessure (*e.g.* Duthie 2006).

A l'instar des nombreuses études consacrées à l'analyse de la tâche lors de compétitions de football, ces études quantifient pour chaque joueur la distance totale parcourue, la distance, la durée ainsi que la fréquence dans des zones d'intensité d'activité. Ces différentes études ont permis de mettre en évidence la nature intermittente de l'activité, composée de phases d'activité dont la durée moyenne est inférieure à 6 s. Elles démontrent également la spécificité par poste. Les avants sont plus impliqués dans les activités de haute intensité que les arrières. Cette différence est essentiellement liée à leur participation dans les activités statiques comme les mêlées et les regroupements. Les arrières sont quant à eux plus impliqués dans les activités de sprint (*e.g.* Duthie et coll. 2003).

Néanmoins les méthodes d'analyse actuelles présentent des limites pour apprécier la sollicitation énergétique et la fatigue associée :

- Les différentes zones d'intensité sont définies à partir de seuils de vitesse identiques pour tous les joueurs. Cependant, l'aptitude physiologique de ces derniers n'est pas identique et l'utilisation d'une zone d'intensité définie par une même vitesse absolue conduit à sous-estimer la charge de travail pour les intensités élevées (Abt et Lovell 2009).
- Lors des phases d'activité brèves la vitesse n'atteint jamais un état stable. Pour apprécier le coût énergétique du déplacement, dans ces conditions, il est nécessaire de considérer le coût énergétique de l'accélération (Osgnach et coll. 2010).
- Lors de l'exercice intermittent, la combinaison des phases de travail et des phases de récupération, en intensité et en durée, va déterminer la sollicitation énergétique et la fatigue associée (Åstrand et coll. 1960a; Balsom et coll. 1992b; Bogdanis et coll. 1996b; Spencer et coll. 2006; Spencer et coll. 2008).

Objectifs de ce travail :

A notre connaissance aucune étude n'a pris en compte ces paramètres dans l'analyse de la tâche en rugby. C'est cette approche que nous proposons de réaliser dans une première

étude. D'autre part, la littérature est riche d'études concernant les sollicitations métaboliques et la fatigue lors de l'exercice intermittent bref et intense (en course à pied ou sur bicyclette ergométrique), néanmoins à notre connaissance, aucune étude n'a été consacrée à l'étude de ces paramètres lors de l'exercice statique maximal bref et intermittent, simulant regroupements et mêlées. Ce type d'effort est majoritaire pour les avants et représente la base du jeu en rugby. C'est ce que nous proposons d'étudier dans le cadre d'une deuxième étude.

Revue de la littérature

Un match de rugby à XV se joue sur deux mi-temps de 40 min, au cours desquelles le temps de jeu effectif moyen varie actuellement entre 30 et 40 min. Le reste du temps est consacré aux arrêts de jeu (pénalités, blessures, ballon hors du jeu). Depuis 2003, les règles ont été modifiées afin de favoriser l’attaque, de dynamiser le jeu et de rendre ce sport plus spectaculaire. En conséquence, le temps de jeu effectif et l’intensité du jeu ont augmenté significativement, entraînant une évolution des qualités physiques des joueurs de rugby parallèlement aux exigences de celui-ci. Pour cette raison nous qualifierons de moderne le rugby postérieur à cette date de 2003.

1. Exigences physiques du Rugby moderne

Les méthodes d’analyse de l’activité ont été initialement développées pour le football professionnel. Elles ont été adaptées, non sans difficultés, à l’analyse de la tâche en rugby. Cependant, et contrairement au football, peu d’études concernent l’analyse de l’activité en rugby à XV lors de compétitions. Nous avons recensé 6 études qui concernent l’analyse de l’activité lors de compétitions sur la période de 1978 à 2003 (Deutsch et coll. 2007; Deutsch et coll. 1998; Docherty 1988; Duthie et coll. 2005; McLean 1992; Morton 1978) et 7 s’intéressant à des compétitions postérieures à 2003 (Austin et coll. 2011a; Cahill et coll. 2012; Coughlan et coll. 2011; Cunniffe et coll. 2009; Eaton et George 2006; Quarrie et coll. 2012; Roberts et coll. 2008). La modification des règles de jeu en 2003 a significativement modifié l’activité des joueurs. Pour cette raison, dans le cadre de ce travail, seuls les résultats de ces dernières études seront présentés dans le cadre de l’analyse de l’activité en compétition. La plupart de ces études, recensées dans le tableau 1, sont basées sur des enregistrements vidéographiques, analysés avec diverses méthodes. Les études les plus récentes utilisent le système GPS (Global Positioning System). Les méthodes d’analyse, le championnat étudié et le nombre de joueurs analysés sont également précisés dans ce tableau.

Tableau 1 : Etudes concernant l’analyse de la tâche du rugby moderne (post 2003).

Auteurs :	Année :	Niveau :	Outils :	Nombre de Joueurs (n) :
Eaton et George	2006	Professionnel (English Premiership)	Vidéo semi automatique (Prozone)	35
Roberts et coll.	2008	Professionnel (English Premiership)	Vidéo suivi manuel	29
Cunniffe et coll.	2009	Professionnel (English Premiership)	GPS	2
Austin et coll.	2011	Professionnel (Super 14)	Vidéo notationnel	20
Coughlan et coll.	2011	International	GPS	2
Cahill et coll.	2012	Professionnel (English Premiership)	GPS	120
Quarrie et coll.	2012	International	Vidéo semi automatique (Verusco)	481

1.1 Méthodes d'analyse vidéographiques

1.1.1 L'analyse par notation.

A notre connaissance, Winterbottom W. (1952) a été le premier à analyser l'activité des joueurs au cours d'un match de football. Dans les années 70, Reilly et Thomas (1976) ont travaillé sur l'optimisation des méthodes d'analyse de la tâche pour les sports collectifs. Pour cela, ils ont utilisé une reproduction du terrain codée afin d'estimer les positions et les distances parcourues par les joueurs. L'activité des joueurs était ensuite subjectivement codée d'après l'analyse du montage vidéo du match. A titre d'exemple les critères permettant de définir les catégories d'activités sont décrits dans le tableau 2. Pour chaque joueur, chaque période d'activité doit être chronométrée ce qui rend l'analyse très longue et fastidieuse. Plus récemment l'outil informatique a permis de légèrement améliorer cette analyse. Duthie et coll. (2005) et Deutsch et coll. (2007) utilisent une méthode qui permet l'analyse des vidéographies à partir d'un logiciel spécifique (Part Timer V1.1, Australian Sports Commission, Canberra) qui permet l'identification de chaque mouvement via une touche séparée sur un clavier d'ordinateur. Le début et la fin de chaque mouvement ainsi que la durée de chaque activité sont ainsi calculés.

Tableau 2 : Exemple de classification d'activité lors d'une analyse de suivi notationnelle. (D'après Deutsch et coll., 2007)

Catégorie :	Description :
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 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.

La principale limite de ce type de méthode concerne la reproductibilité des données analysées. Duthie et coll. (2005) ont analysé la reproductibilité de cette méthode sur dix joueurs de rugby. La vidéographie a été analysée à 2 reprises par le même opérateur, à un mois d'intervalle. Les résultats de cette étude démontrent une reproductibilité modérée à pauvre pour le calcul du temps total passé dans les différentes catégories d'intensité. Le nombre d'actions discrètes par catégories présente une reproductibilité pauvre à bonne et la durée moyenne des mouvements par catégories a une reproductibilité modérée. Les auteurs concluent logiquement que la méthode d'analyse notationnelle est un outil d'évaluation modérément reproductible pour l'étude des déplacements du joueur de rugby.

Cette méthode d'analyse présente l'avantage d'être peu coûteuse en matériel. Cependant, elle présente des inconvénients majeurs : un temps d'analyse très important et une reproductibilité modérée. Ces limites associées ont favorisé l'utilisation de technologies d'analyses en partie automatisées.

1.1.2 Les méthodes de suivi semi-automatique.

A ce jour, aucun système d'analyse n'est entièrement automatisé et c'est pour cette raison que l'on parle de systèmes semi-automatiques. Ces systèmes ont été largement utilisés pour analyser l'activité en football. Les plus utilisés à l'heure actuelle sont les systèmes Amisco® (Sport universal process, Nice, France) et ProZone™ (West Yorkshire, England). Ces systèmes permettent un suivi passif (sans marqueurs) des joueurs grâce aux 6 à 8 caméras, installées autour du stade et calibrées, dont la fréquence d'acquisition est de 25 Hz. Le nombre et le positionnement des caméras dépendent de facteurs tels que la dimension du terrain ou l'architecture du stade (hauteur de tribune et distance de la tribune par rapport au terrain notamment). Le stade et le terrain sont alors calibrés en hauteur, profondeur et largeur puis transformés en un espace à 2 dimensions afin de permettre le calcul instantané de la position des joueurs (coordonnées x et y). Chaque joueur est initialement identifié et sa trajectoire suivie automatiquement. Des informations secondaires comme la couleur du maillot, la reconnaissance optique du numéro du maillot ainsi que la prédiction des trajectoires de course facilitent le suivi.

Néanmoins lorsque les joueurs sont regroupés dans un petit espace, les joueurs se croisent

dans le champ des caméras, créant alors un phénomène d'occlusion et nécessitant une intervention humaine pour identifier à nouveau chaque joueur. Ce phénomène est fréquent en rugby en raison du nombre important de regroupements. La figure 1 montre le principe de l'analyse et les données extraites.

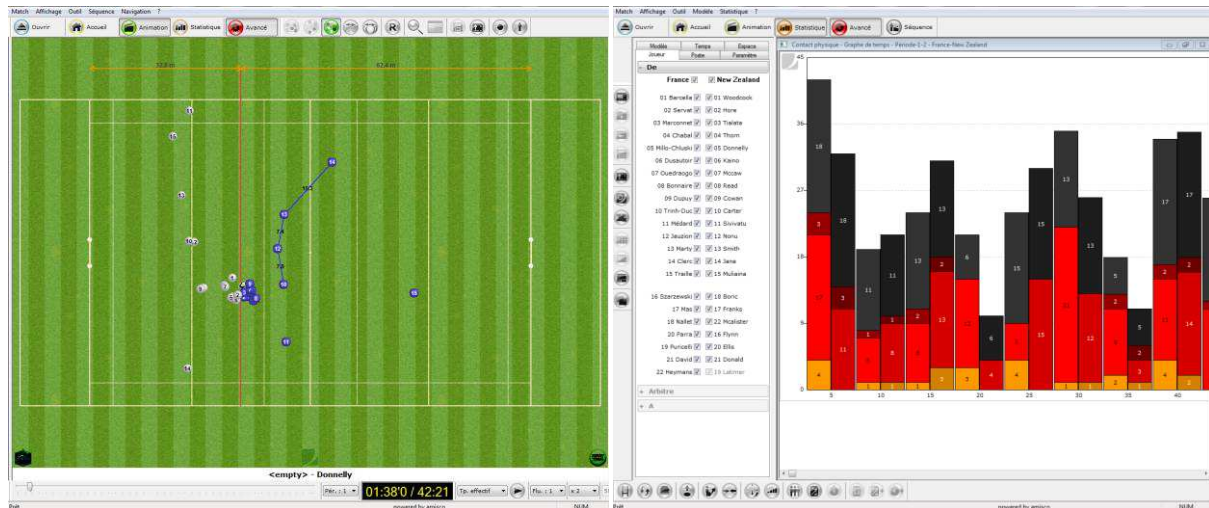


Figure 1 : Exemples d'utilisations du système Amisco viewer® : du match à l'analyse des efforts.

Initialement ces outils étaient destinés à l'analyse des matchs par l'encadrement technique et n'ont donc pas réellement été validés. Les publications récentes d'articles scientifiques, concernant le football et le rugby et utilisant cet outil, ont motivé une validation *a posteriori*. Di Salvo et coll. (2006) ont réalisé une étude de validation du système Prozone®, outil similaire à Amisco Pro®. Les données obtenues avec le système Prozone® ont été comparées aux données collectées par des cellules photoélectriques. Les résultats indiquent que la vitesse moyenne, calculée d'après les données de déplacement acquises avec le système Prozone lors de courses de 15 à 60 m, sont fiables et reproductibles (ICC = 0,99 et 0,95 respectivement ; Erreur typique de mesure 0,2 %). Les auteurs concluent ainsi que le système Prozone® est un système valide pour l'analyse des mouvements des joueurs sur un terrain de football. Plus récemment, Zubillaga (2006) a réalisé une étude de fiabilité du système Amisco®, en comparant les données obtenues par le système Amisco et celles calculées à partir d'une analyse vidéo de joueurs courant autour d'une piste à différentes vitesses prédéfinies. Il montre que la fiabilité du système est importante pour la mesure des distances parcourues (ICC = 0,998 ; $P < 0,001$) ainsi que pour le calcul des vitesses (ICC = 0,995 ; $P < 0,001$). Ces deux systèmes semi-automatiques semblent être des outils

fiables et reproductibles pour l'étude des déplacements de joueurs en match.

Ces systèmes sont installés à la demande des clubs ou des fédérations dans les stades où se déroulent les compétitions. Les résultats d'analyse du match sont communiqués sous 48 h par le prestataire et facturés. Ce fonctionnement implique un coût non négligeable ainsi qu'un délai dans la transmission des résultats. Enfin, indépendamment du délai d'obtention des résultats et du coup de la prestation, ces systèmes ne permettent pas l'analyse de l'activité au cours de l'entraînement. Or ces dernières années, en raison du nombre croissant de compétitions, il est apparu fondamental de quantifier la charge totale de travail afin de gérer la récupération et de prévenir la fatigue généralement associée aux risques de blessures. C'est dans ce contexte que l'outil GPS a été adapté à l'analyse de l'activité en sport collectif.

1.2 L'outil GPS.

Le principe consiste à mesurer le temps nécessaire au signal radio émis par une balise GPS sur terre pour être réceptionné par un satellite. A partir de cette vitesse de propagation du signal radio, il est possible de calculer la distance entre le satellite et la balise par simple intégration. Si le signal de la balise GPS est réceptionné par au moins 3 satellites (voire 4 pour plus de précision), la position de la balise peut alors être connue par triangulation (Aughey 2011; Larsson 2003). Le développement des balises dont la taille et la précision évoluent régulièrement rendent son utilisation possible en sport collectif. Jusqu'en 2010, l'International Rugby Board (IRB), qui régit les lois et codes du rugby, n'autorisait pas le port des GPS en matchs, limitant ainsi leur utilisation aux entraînements. Depuis cette date, l'acquisition des données en match via les systèmes GPS est autorisée. L'application de ce système de mesure GPS en rugby est maintenant possible en match et à l'entraînement (Aughey 2011).

Plusieurs études récentes ont testé la validité des systèmes GPS pour l'analyse de l'activité en sports collectifs (Coutts et Duffield 2010; Johnston et coll. 2012; Varley et coll. 2012). Coutts et coll. (2010) montrent que les GPS dont la fréquence d'acquisition était de 1 Hz ont une reproductibilité bonne à correcte pour les vitesses faibles mais que cette reproductibilité diminue de façon importante lorsque la vitesse augmente (entre 10 et 30 % de

reproductibilité intra-modèle pour des vitesses supérieures à 14,4 km.h⁻¹). L'étude de Johnston et coll. (2012) démontre une bonne fiabilité pour la mesure de l'activité avec des GPS possédant une fréquence d'acquisition de 5 Hz pour des vitesses inférieures à 20 km.h⁻¹. Varley et coll. (2012) confirme que la précision du système GPS dépend de la fréquence d'acquisition utilisée. Ils démontrent que les GPS possédant une fréquence d'acquisition de 10 Hz sont 6 fois plus précis que les systèmes à 5 Hz pour le calcul de la vitesse de course instantanée. La précision de ce système de mesure semble également pouvoir être améliorée par l'utilisation de balises de références, positionnées sur terre à proximité du lieu des mesures (dGPS ; Larsson 2003).

Le système GPS est un système en cours de développement dont l'usage devrait se généraliser dans les années à venir. Néanmoins, à ce jour, l'analyse vidéographique reste la méthode de référence pour l'analyse de l'activité en sports collectifs.

2. Analyse de l'activité lors de compétition de rugby à XV

D'un point de vue global, cette analyse consiste à définir des zones d'intensités selon des critères subjectifs (analyse notationnelle) ou objectifs (analyse avec les systèmes semi-automatiques et GPS). Dans un deuxième temps, pour chaque joueur, le temps passé dans les différentes zones est mesuré. Ceci permet de calculer la distance parcourue dans les différentes zones d'activité ainsi que la distance totale parcourue au cours du match. Les comparaisons sont souvent effectuées entre les avants (Av) et les arrières (Ar). Si le nombre de joueurs analysés est suffisant, ces deux groupes sont généralement subdivisés en quatre sous-groupes (déterminés en fonction de la demande physique spécifique à chaque poste) en accord avec la proposition de Deutsch et coll. (1998) : le groupe des piliers et 2^{ème} ligne (P2L), le groupe des talons et 3^{ème} ligne (T3L), le groupe des centres (Centres) composé du demi d'ouverture et des centres et le groupe des ailiers et des arrières (AlAr). Le demi de mêlée est généralement exclu des analyses en raison de la spécificité de la demande physique spécifique à ce poste qui ne permet pas de l'intégrer dans un des sous-groupes décrits précédemment.

2.1 Distance totale parcourue

Les premières estimations de la distance parcourue au cours d'un match de rugby ont été réalisées par Morton et coll. (1978). Les résultats de cette étude indiquent qu'un centre parcourt un total de 5800 m, repartit en 2200 m de marche, 1600 m de course à allure modérée (jogging) et 2000 m en sprint. Les distances moyennes parcourues par des joueurs professionnels au cours d'un match de rugby de l'ère moderne ont été déterminées par plusieurs auteurs et différentes méthodes d'analyse (Austin et coll. 2011a; Cahill et coll. 2012; Coughlan et coll. 2011; Cunniffe et coll. 2009; Quarrie et coll. 2012; Roberts et coll. 2008) : ces résultats sont présentés dans le tableau 3. L'analyse globale des résultats démontre que les arrières parcourent une distance plus importante que les avants. Les résultats de l'analyse des sous-groupes divergent selon les études. Roberts et coll. (2008) démontrent que les P2L et les T3L parcourent la même distance totale moyenne durant le match. La comparaison entre les Centres et les AIAr conduit à la même conclusion. Par contre, l'analyse conduite par Austin et coll. (2011a) met en évidence que les Centres parcourent une distance totale moyenne supérieure à celle parcourue par les P2L et les AIAr. Cette différence pourrait être liée au fait que ces études concernent deux championnats d'élite de nations différentes et/ou que des méthodes d'analyses différentes ont été utilisées.

Tableau 3 : Distances totales parcourues au cours d'un match de rugby à XV, en fonction du poste.

Etude :	Avants	Arrières
Roberts et coll. (2008)	5581 ± 692	6127 ± 724
Austin et coll. (2011)	4962	5434,5
Coughlan et coll. (2011)	6427	7002
Quarrie et coll. (2012)	5540	5900
Cunniffe et coll. (2009)	6680	7227
Cahill et coll. (2012) *	5850	6545

* : Données médianes présentées.

Cette analyse de la distance parcourue donne une indication de la charge globale imposée par l'activité mais ne nous renseigne pas sur l'intensité de cette charge, variable qui va déterminer la dépense énergétique. Dans cet objectif, l'analyse de l'activité a été réalisée en considérant le temps passé dans différentes catégories d'intensité.

2.2 Analyse par catégories d'intensité.

Comme on l'a décrit précédemment, lors d'une analyse vidéographique par la méthode de notation, les différentes catégories d'intensité sont déterminées de façon subjective d'après l'analyse visuelle du déplacement du joueur. Les études utilisant l'analyse vidéographique à l'aide d'un suivi semi-automatique fixent des zones de vitesse correspondant chacune à une catégorie d'intensité. Le nombre de catégories d'intensité varie en fonction des études et ne correspondent pas forcément aux catégories définies par la méthode de notation. On retrouve néanmoins systématiquement les catégories « station debout », « marche » et « jogging ». Les seuils de vitesse utilisés varient également d'une étude à l'autre. Par exemple, dans l'étude de Eaton et George (2006) l'activité de marche correspond à une vitesse comprise entre 0,5 et 2 m.s⁻¹ alors que dans l'étude de Roberts et coll. (2008), cette même activité, correspond à une vitesse comprise entre 0,5 et 1,7 m.s⁻¹. Cahill et coll. (2012) ont été les premiers à proposer des catégories d'intensité individualisées par rapport à la vitesse maximale en sprint.

Afin de simplifier l'analyse et avoir une vue plus globale, certains auteurs, utilisant la méthode de notation, proposent de regrouper les activités de faibles intensités (catégories « station debout », « marche » et « jogging ») et de considérer qu'il s'agit de périodes de récupération. Les activités dont l'intensité est supérieure à celle du « jogging » et les phases d'activités statiques dans les regroupements sont considérées comme des périodes d'activité intense (Austin et coll. 2011a; Duthie et coll. 2005). Pour les auteurs ayant analysé l'activité à l'aide de systèmes semi-automatique les activités de course sont considérées comme intense si elles sont supérieures à 4 m.s⁻¹ pour Eaton et George (2006) et 5 m.s⁻¹ pour Roberts et coll. (2008).

Le pourcentage du temps moyen consacré aux activités de faible intensité (périodes de récupération) est présenté dans le tableau 4. Ce pourcentage représente selon les études entre 80 et 90,8 % du temps total de jeu pour les avants et entre 88 et 95 % pour les arrières. En conséquence le temps passé dans les activités intense représente un pourcentage du temps total de jeu relativement faible. Le temps moyen passé dans des activités intense en fonction des différentes études est décrit dans le tableau 5.

Tableau 4 : Pourcentage du temps passé dans les différentes catégories de faible intensité (FI)

Etude :	Variable :	Avants	Arrières
Eaton et Keith (2006)	Arrêt	22,7	17,9
	Marche	48,3	59,8
	Jogging	17,6	15,1
	Total FI	88,6	92,8
Roberts et coll. (2008)	Arrêt	32,4	29,3
	Marche	35	46
	Jogging	17	17
	Total FI	84,4	92,3
Austin et coll. (2011)	Arrêt	37	32,5
	Marche	28,5	41
	Jogging	14,5	14,5
	Total FI	80	88
Coughlan et coll. (2011)	Arrêt	40	33,2
	Marche	31,4	38,1
	Jogging	17	16,6
	Total FI	88	87,9
Cunniffe et coll. (2011)	Arrêt / Mar	66,5	77,8
	Jogging	24,3	13
	Total FI	90,8	90,8

Tableau 5 : Temps passé dans les activités de haute intensité en fonction du poste (moyenne \pm ET ou Min-Max).

Etude :	Avants	Arrières
Eaton et George (2006)	8 min 26 s - 10 min 49 s	5 min 55 s - 8 min 05 s
Roberts et coll. (2008)	9 min 09 s \pm 1 min 39 s	3 min 04 s \pm 1 min 01 s
Austin et coll. (2011)	16 min 55 s - 19 min 50 s	9 min 30 s - 14 min 36 s

Les différences méthodologiques rendent difficile la comparaison des données issues des différentes études, cependant la tendance générale indique que les avants sont plus impliqués dans des activités de haute intensité que les arrières (temps total compris entre 9 et 19 min pour les avants et 3 et 7 min pour les arrières selon les études). Cette différence est essentiellement liée au temps passé par les avants dans les activités statiques et notamment les mêlées. Roberts et coll. (2008) montrent en effet que les avants passent en moyenne environ 8 min dans des activités statiques contre moins de 2 min pour les arrières. Les 3^{ème} lignes et les talonneurs sont les joueurs les plus impliqués dans les phases statiques (Duthie et coll. 2005; Roberts et coll. 2008). Les arrières sont significativement

plus impliqués dans les activités de course intense et de sprint que les avants (Duthie et coll. 2005; Eaton et George 2006; Roberts et coll. 2008).

La particularité du rugby réside dans le fait que chaque action intense démontre une durée moyenne relativement faible. Les études conduites par Eaton et George (2006) sur le championnat professionnel anglais démontrent que la durée moyenne des activités intenses est de 2,5 s pour les avants et 1,7 s pour les arrières. La durée moyenne d'une mêlée est de 5,8 s et la durée des activités de course intense (vitesse supérieure à $5,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) inférieur à 2 s. L'étude de Roberts et coll. (2008) concernant le même championnat confirme ces résultats. L'analyse de ces études confirme que le rugby est une activité intermittente, constituée de périodes brèves d'activités intenses, entrecoupées de périodes de récupérations, dont la durée et l'intensité varient en fonction du jeu.

Le calcul du ratio entre la durée des phases d'activité intense et la durée des phases de récupération est alors généralement utilisé pour caractériser l'activité intermittente. Les ratios globaux (durée moyenne des séquences de jeu: durée moyenne des phases de récupération) ont été calculés et analysés pour la première fois en rugby par McLean et coll. (1992) lors du tournoi des 5 Nations de la saison 1989-1990. Récemment, Eaton et George (2006), Cunniffe et coll. (2009) ainsi que Austin et coll. (2011a) ont calculé ces ratios en divisant le temps moyen passé dans les activités de haute intensité par le temps moyen de récupération. Ces trois études rapportent des ratios compris entre 1:10 et 1:4 pour les avants et compris entre 1:15 et 1:5 pour les arrières. L'étendue importante de ces ratios est liée à l'utilisation de différentes méthodes d'analyse et à l'utilisation de seuils de vitesse différents pour définir les activités intenses. Néanmoins et en dépit des différences méthodologiques, cette analyse des ratios semble indiquer que les arrières ont des périodes de récupération plus importante que les avants.

2.3 Limites des méthodologies actuelles et objectifs de l'étude 1

La principale limite des analyses réalisées à l'aide de systèmes de suivi semi-automatique est que les caractéristiques physiologiques des individus ne sont pas prises en compte. En effet, la majorité des études ont déterminé les différentes catégories de mouvement à partir de valeurs de vitesse absolue (Coughlan et coll. 2011; Cunniffe et coll. 2009; Quarrie et coll.

2012; Roberts et coll. 2008). Cependant Abt et Lowell (2009) ont souligné l'importance d'individualiser les seuils de vitesse pour définir les catégories d'intensité : l'utilisation de vitesses absolues peut entraîner une sous-estimation du temps passé et de la distance parcourue dans les activités intenses. A notre connaissance, rares sont les études ayant utilisées des seuils de vitesses individualisés en fonction des caractéristiques physiologiques des joueurs en sport collectif (Vignes et coll. 2010 ; Buchheit et coll. 2010 ; Cahill et coll. 2012 ; Mendez-Villanueva et coll. 2013) et en rugby (Cahill et coll. 2012). A noter que seule l'étude de Cahill et coll. (2012) considère des seuils individualisés en fonction de la vitesse maximale déterminée lors d'un sprint.

L'objectif idéal de l'analyse de l'activité est d'estimer la sollicitation énergétique lors des compétitions afin d'apprécier les qualités requises, et ainsi proposer un entraînement adapté à l'amélioration de celles-ci. La quantification de la dépense énergétique implique de connaître la part relative de chacune des voies métaboliques permettant la resynthèse de l'ATP. Cette quantification est complexe pour les voies anaérobies et nécessitent des méthodes invasives (biopsies) et/ou des moyens lourds et coûteux (Résonance magnétique au Phosphate 31 ($^{31}\text{P-NMR}$)). La participation de la voie aérobie est plus simple à apprécier car la mesure de la fréquence cardiaque (Fc) permet de quantifier de façon relativement précise et non invasive la participation de cette voie métabolique. Le problème est que cette mesure nécessite le port d'un cardio-fréquencemètre interdit en compétition en raison des risques de blessures qui pourraient être occasionnées lors des phases de contact. L'étude récente de Cuniffe et coll. (2009) présente des mesures de Fc pour un avant et un arrière. La Fc moyenne (Fcmoy) pour les deux joueurs représente environ 88 % de la fréquence cardiaque maximale (Fcmay). Ce résultat est en accord avec la valeur de 86 % de Fcmay observée lors de compétition de rugby universitaire (Sparks et Coetzee 2013). Les mesures de Fc de l'étude de Cuniffe et coll. (2009) ont également été utilisées pour estimer la consommation d' O_2 ($\dot{V}\text{O}_2$) d'après la relation Fc- $\dot{V}\text{O}_2$ déterminée préalablement. Leur calcul suggère une $\dot{V}\text{O}_2$ moyenne pendant la rencontre représentant entre 80 et 85 % de $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$. Les auteurs appellent néanmoins à la prudence quant à l'interprétation des résultats en raison du fait que, pour une $\dot{V}\text{O}_2$ donnée, la Fc est significativement plus élevée lors d'un exercice isométrique que lors d'un exercice dynamique (Maas et coll. 1989; Patterson et coll. 1985).

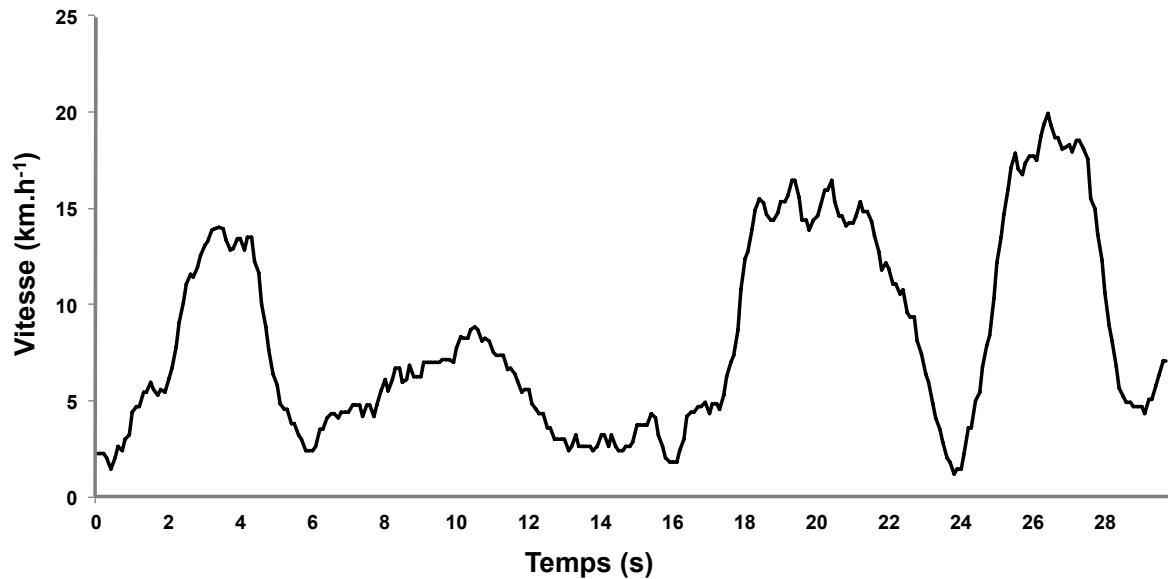


Figure 2 : Profil classique de l'évolution de la vitesse (en km.h⁻¹) lors d'une séquence de match de rugby.

En raison de ces limites méthodologiques, la mesure de la vitesse reste le paramètre le plus accessible pour apprécier la sollicitation énergétique. La nature intermittente brève de l'activité en rugby implique que les vitesses de déplacement élevées n'atteignent presque jamais un état stable et que l'activité du joueur de rugby se caractérise par une succession de phases d'accélération suivies de phases de décélération comme le montre la figure 2.

Cependant, le coût énergétique de la course à vitesse constante n'est pas représentatif du coût énergétique d'une accélération. L'étude de Osgnach et coll. (2010) propose de considérer le coût énergétique correspondant à la vitesse initiale et le coût énergétique de l'accélération pour apprécier la dépense énergétique totale. Il apparaît donc important de prendre en compte l'accélération dans l'analyse de l'activité. A notre connaissance, une seule étude s'est intéressée à l'analyse des accélérations en rugby à XV. Cunniffe et coll. (2009) ont analysé les accélérations de 2 joueurs avec des GPS dotés d'accéléromètres, lors d'un match opposant deux équipes professionnelles. Ils ont dénombré 141 et 147 accélérations de plus de 1,5 m.s⁻² pour l'arrière et l'avant étudiés respectivement.

D'autre part, à l'heure actuelle, les différentes études ayant caractérisé l'activité lors de compétitions de rugby à XV ont calculé des ratios à partir du temps moyen des activités intenses et du temps moyen de récupération (Austin et coll. 2011a; Cunniffe et coll. 2009; Eaton et George 2006). Cette approche globale permet d'objectiver la nature intermittente

de l'activité mais ne permet pas d'apprécier la sollicitation énergétique. En effet, la nature du jeu conduit à des combinaisons d'intensité et de durée très variables pour chaque phase d'activité et de récupération. De plus, il a été démontré que pour un ratio donné, la durée des phases d'activité (Åstrand et coll. 1960; Balsom et coll. 1992a) ainsi que l'intensité de ces phases d'activité et de récupération (Åstrand et coll. 1960; Bogdanis et coll. 1996b; Spencer et coll. 2006) influençaient de façon significative le temps de maintien de l'activité intermittente. De même, les résultats de l'étude de Margaria et coll. (1969) démontrent que pour une durée d'activité donnée (10 s) le temps de maintien de l'activité est lié à la durée de la récupération entre les phases d'activité : le temps d'épuisement est d'autant plus rapide que le ratio est élevé (*i.e.* que la période de récupération est courte). En conséquence, il apparaît important de déterminer ces ratios pour chaque joueur et chaque période d'activité et de les analyser en fonction de la durée et de l'intensité de chaque phase d'activité afin de comprendre la sollicitation énergétique lors d'une compétition de rugby. Par conséquent, dans une première étude, nous proposerons une nouvelle approche prenant en compte les limites actuelles de l'analyse de l'activité : des seuils de vitesse individualisés et le calcul des accélérations. D'autre part, les ratios individuels seront calculés et analysés pour apprécier la sollicitation métabolique. L'évolution des différents paramètres étudiés au cours du match sera également analysée.

3. Fatigue et exercice intermittent

Une compétition de rugby de 80 min représente actuellement un temps total de jeu effectif variant de 30 à 40 min, ce temps étant réparti en deux périodes séparé par une mi-temps de 10 min. Le joueur de rugby performant doit donc être capable de soutenir une activité intermittente d'une durée au moins égale à 20 min si l'on considère que la mi-temps pourrait permettre une récupération complète. Cette activité intermittente est constituée de phases d'activités intenses dont la durée moyenne est inférieure à 6 s et de courses dont l'intensité varie, de sauts, de plaquages et d'activités statiques ou quasi statiques dans les mêlées ou les regroupements. Dans ces conditions d'activité, l'estimation directe et précise de la dépense énergétique est impossible. L'analyse de la fatigue permet indirectement d'apprécier les qualités physiologiques associées à la capacité à répéter des efforts intenses. Cette analyse permettra d'optimiser la préparation physique et la récupération.

3.1 Fatigue et exercice intermittent dynamique

La plupart des études s'intéressant à l'exercice intermittent et à la fatigue associée concernent des efforts dynamiques et la répétition de phases d'activité et de récupération de durée fixe. En ce qui concerne les intensités étudiées, la plupart des études conduites entre les années 1960 et 1980, s'intéressaient à des phases d'activité à la puissance maximale aérobie (PMA, Åstrand et coll. 1960; Essén 1978; Saltin et coll. 1976) à l'exception cependant de l'étude de Margaria et coll. (1969) qui ont étudié des intensités supra maximales. Depuis les années 1990, la plupart des études sur cette problématique étudient l'exercice maximal (*e.g* Girard et coll. 2011; Glaister 2005; Spencer et coll. 2005).

Les premières études conduites sur le travail intermittent avec des phases d'activité à PMA et une récupération passive démontrent que les combinaisons 60 - 60 s, 30 - 30 s et 15 - 15 s (ratio 1:1) permettent le maintien de l'exercice intermittent pendant au moins une heure (Åstrand et coll. 1960; Essén 1978). Lorsque l'intensité de l'exercice est supérieure à PMA (supra maximale ; intensité conduisant à l'épuisement en 30 à 40 s), comme dans l'étude proposée par Margaria et coll. (1969), et d'une durée égale à 10 s, le temps de maintien de l'exercice intermittent dépend de la durée de la récupération passive : il est d'environ 100 s pour une durée de récupération de 10 s (ratio 1:1), de 200 s pour une durée de récupération de 20 s (ratio 1:2) et théoriquement infini pour une durée de récupération de 30 s (ratio 1:3). Si l'on considère l'analyse de l'activité lors de la compétition en rugby, qui démontre des durées moyennes d'activité intense inférieures à 5 s et des ratios moyens compris entre 1:10 et 1:4 pour les avants et compris entre 1:15 et 1:5 pour les arrières, il est peu probable que les phases d'activités impliquant des intensités proches de la vitesse maximale aérobie (VMA) soient fatigantes. Les études recensées dans le tableau 6 concernent la répétition de sprint brefs (au moins 4 s et entrecoupées de périodes de récupération de 30 s) sur bicyclette ergométrique ou en sprint. Ces études recensées pour la plupart dans la revue de littérature proposée par Girard et coll. (2011) démontrent une diminution de performance rapide sur des périodes totales d'exercice variant de 2 min 30 s à environ 12 min.

La fatigue peut se définir par la diminution de la capacité d'un muscle à générer une force

ou une puissance maximale (Bigland-Ritchie et Woods 1984). La fatigue est la combinaison d'un ensemble de facteurs intervenant du niveau central (*i.e* depuis la génération de l'ordre moteur au niveau du cerveau) jusqu'au niveau périphérique (*i.e* jusqu'à la formation des ponts actine-myosine et à la production de force par le muscle). Elle peut être liée à l'accumulation de métabolites dans le muscle qui perturbe l'homéostasie (facteurs métaboliques) entraînant une diminution de l'excitabilité de la cellule musculaire, du couplage excitation - contraction et de l'interaction des myofibrilles et/ou à un défaut de la commande motrice qui ne permet plus de stimuler les muscles de façon adéquate (facteur nerveux).

3.1.1 Facteurs métaboliques

L'étude de référence concernant les facteurs métaboliques associés à l'exercice maximal intermittent est celle de Gaitanos et coll. (1993). Dans cette étude les sujets ont réalisé 10 sprints de 6 s sur bicyclette ergométrique entrecoupés de périodes de récupération de 30 s (ratio 1:5). Des biopsies musculaires ont été prélevées au repos, à l'issue du premier sprint, avant et après le 10^{ème} et dernier sprint.

A l'issue du premier sprint Gaitanos et coll. (1993) observent une déplétion moyenne de 13 % des stocks d'ATP (de $24,0 \pm 2,7$ à $20,9 \pm 2,5$ mmol d'ATP.kg⁻¹ de muscle sec après exercice) et une déplétion moyenne des stocks de PCr de 57 % (de $76,5 \pm 7,2$ à $32,9 \pm 2,6$ mmol d'ATP.kg⁻¹ de muscle sec après exercice) à l'issue du premier sprint. Dans des conditions d'exercice similaires, Dawson et coll. (1997) observent une diminution de 15,6 % de la concentration en ATP et de 36,1 % pour la PCr.

Tableau 6 : Protocoles expérimentaux et diminution de performance des principales études concernant la répétition d'efforts brefs (<10 s) et intenses.

Auteur (Année)	Type d'effort	Durée Travail (s)	Durée Récupération (s)	Ratio (T:R)	Nombre de Répétitions (n)	Diminution de performance :
Gaitanos et coll. (1991)	Vélo	6	30	1:5	x 10	MPO : -20,5 %
Hamilton et coll. (1991)	Vélo	6	30	1:5	x 10	PPO : -21,8 ± 13,2
Balsom et coll. (1992a)	Sprint (course)	5"50 (40m)	30	≈1:6	x 15	Temps : -11 %
			60	≈1:12		Temps : -3,5 %
			120	≈1:24		-
Balsom et coll. (1992b)	Sprint (course)	2"62 (15m)		≈1:12	x 40	-
		4"46 (30m)	30	≈1:6	x 20	Temps : -4,5 %
		5"61 (40m)		≈1:5	x 15	Temps : -11 %
Gaitanos et coll. (1993)	Vélo	6	24	1:4	x 10	PPO : -33,4 % ; MPO : -26,6 %
Dawson et coll. (1997)	Vélo	6	24	1:4	x 5	PPO : -10,5 ± 5,0 %
Wadley et coll. (1998)	Sprint (course)	≈3"11 (20m)	≈17	≈1:6	x 12	Temps : 5,5 ± 3,3 %
Hautier et coll. (2000)	Vélo	5	25	1:5	x 15	MPO : -11,3 %
Tomlin et coll. (2002)	Vélo	6	30	1:5	x 10	PPO : -8,8 ± 3,7 %
Yquel et coll. (2002)	Flexion plantaire	8	30	1:4	x 5	MPO : -23 %
Bishop et coll. (2003)	Vélo	6	24	1:4	x 5	PPO : -9,0 ± 2,4 %
Bishop et coll. (2004)	Vélo	6	24	1:4	x 5	PPO : -7,3 ± 3,4 %
Billaut et coll. (2005)	Vélo	6	30	1:5	x 10	PPO : -7 %

PPO : Pic de Puissance ; **MPO** : Puissance moyenne

Tableau 6 (suite) : Protocoles expérimentaux et diminution de performance des principales études concernant la répétition d'efforts brefs (<10 s) et intenses.

Auteur (Année)	Type d'effort	Durée Travail (s)	Durée Récupération (s)	Ratio (T:R)	Nombre de Répétitions (n)	Diminution de performance :
Billaut et coll. (2006)	Vélo	6	30	1:5	x 10	PPO : -11 %
Spencer et coll. (2006)	Vélo	4	21	≈1:5	x 6	PPO : 5,6 ± 1,8 %
Bishop et coll. (2006)	Vélo	6	24	1:4	x 5	PPO : 5,6 ± 3,7 %
Billaut et coll. (2007)	Vélo	6	30	1:5	x 10	PPO : -12,2 %
Mendez-Villanueva et coll. (2007)	Vélo	6	30	1:5	x 10	PPO : -24,1 % ; MPO : -27,7 %
Racinais et coll. (2007)	Vélo	6	30	1:5	x 10	PPO : -11 %
Spencer et coll. (2008)	Vélo	4	21	≈1:5	x 6	
Mendez-Villanueva et coll. (2008)	Vélo	6	30	1:5	x 10	PPO : -24,1 % ; MPO : -27,7 %
Buchheit et coll. (2009)	Sprint (course)	4	21	≈1:5	x 6	MPO : -3,2 ± 1,3 %
Perrey et coll. (2010)	Sprint (course)	≈ 6	30	1:5	x 12	Temps : -17 %
Billaut et coll. (2010)	Vélo	5	25	1:5	x 20	PPO : -23,5 %
Dupont et coll. (2010)	Sprint (course)	4"34 (30m)	20	1:4	x7	Temps : -7,7 %
da Silva et coll. (2010)	Sprint (course)	≈5" (34,2m)	25	1:5	x7	Temps : -4,0 ± 1,9 %
Smith et Billaut (2010)	Vélo	5	30	1:6	x 10	Travail : -31,2 %
Mendez-Villanueva et coll. (2012)	Vélo	6	30	1:5	x 10	PPO : -24,1 ± 9,4 %

PPO : Pic de Puissance ; **MPO** : Puissance moyenne

Parolin et coll. (1999) ont réalisé une biopsie 6 s après un départ pour un sprint de 30 s (sur bicyclette ergométrique et en condition isocinétique), leurs résultats ne démontrent pas de diminution significative de la concentration en ATP mais une diminution significative des stocks de PCr d'environ 48 %. Lors d'un sprint sur 100 m, les stocks de PCr disponibles sont déplétés dès le 40^{ème} m (*i.e.* moins de 5 s, Hirvonen et coll. 1987).

A l'issue d'un sprint de 6 s, Gaitanos et coll. (1993) mesure une concentration en lactate musculaire ($[La]_m$) de 40 mmol.kg⁻¹ de muscle sec et Dawson et coll. (1997) une concentration de 42,5 mmol.kg⁻¹ de muscle sec. Il semblerait que, lors de l'exercice maximal de courte durée, $[La]_m$ et la concentration en proton (H⁺) augmente linéairement jusqu'à 15 s d'exercice (Parolin et coll. 1999). En accord avec cette observation, Bogdanis et coll. (1998) observe la valeur de 51,0 ± 4,6 mmol de lactate par kg⁻¹ de muscle sec à l'issue d'un sprint de 10 s sur bicyclette ergométrique.

La contribution du système aérobie lors d'un effort bref et intense est difficile à apprécier en raison de problèmes méthodologiques. Parolin et coll. (1999) ont estimé le renouvellement de l'ATP par la filière aérobie à 1,32 mmol ATP.kg⁻¹ de muscle sec lors des six premières secondes d'un sprint sur bicyclette ergométrique en condition isocinétique. Bogdanis et coll. (1998) ont évalué cette contribution par la mesure de la $\dot{V}O_2$ avec la méthode des sacs de Douglas lors de sprints d'une durée de 6 et 10 s. Leurs résultats démontrent une contribution de la voie aérobie de 12 et 13 % respectivement. Peronnet et Thibaut (1989) ainsi qu'Arsac et Locatelli (2002), ont modélisé la contribution des filières aérobies et anaérobies sur le sprint (<100 m), à partir d'une analyse mathématique des records du monde. Ces auteurs estiment à environ 5 % la contribution du métabolisme aérobie dans la production d'énergie totale.

Dans l'étude de Gaitanos et coll. (1993), les sprints de 6 s sur ergocycle sont répétés 10 fois toutes les 30 s. La puissance pic et la puissance moyenne sont diminuées de 33,4 et 26,6 % respectivement à l'issue du 10^{ème} sprint. A l'issue de 5 sprints dans les mêmes conditions, Dawson et coll. (1997) observent une diminution de 23,8 % de la puissance pic. Avant le 10^{ème} sprint, la concentration musculaire en PCr ($[PCr]$) était de 37,5 mmol par kg de muscle frais. La période de 30 s entre chaque sprint ne permet donc pas la resynthèse complète de la PCr utilisée pendant le sprint qui précède. A l'issue du 10^{ème}

sprint, [PCr] diminue jusqu'à $12,2 \text{ mmol.kg}^{-1}$. Cette valeur était de $21,1 \text{ mmol.kg}^{-1}$ à l'issue de la série de 5 sprints de l'étude de Dawson et coll. (1997). $[\text{La}]_m$ mesurée avant le 10^{ème} sprint, en accord avec celle mesurée par Dawson et coll. (1997) au bout du 5^{ème} sprint, augmente faiblement d'environ 3,4 % pendant le dernier sprint. Parallèlement la concentration en lactate sanguin ($[\text{La}]_s$) passe de 2 mmol.l^{-1} à l'issue du sprint 1, à environ 9 mmol.l^{-1} à l'issue du sprint 5, pour atteindre environ 13 mmol.l^{-1} à l'issue du dernier sprint. En course à pied, Buchheit et coll. (2010) ont mesuré des valeurs moyennes de $[\text{La}]_s$ de $9,3 \pm 2,4 \text{ mmol.l}^{-1}$ à l'issue d'une série 6 sprints de 25 m avec des départs toutes les 25 s, confirmant ainsi les résultats des études précédentes. Le pH sanguin, quant à lui, diminue de 7,34 à 7,18 puis 7,10 respectivement (Gaitanos et coll. 1993). Les résultats de l'étude de Bishop et coll. (2004) obtenus à l'issue d'une série de 5 sprints de 6 s toute les 30 s, confirment l'augmentation significative de la concentration en lactate et en H^+ dans le muscle et dans le sang.

En résumé, sur les premiers sprints la dégradation de la PCr et la glycolyse permettent de soutenir le débit élevé de renouvellement de l'ATP. Au fil des sprints, les stocks de PCr diminuent car les périodes de récupération ne permettent pas sa resynthèse complète et la glycolyse est progressivement inhibée. En conséquence, la part relative de la voie aérobie augmente progressivement et le niveau de performance diminue. Cette sollicitation progressive de la voie aérobie lors d'exercice de sprints répétés a été observée dans différentes études (Balsom et coll. 1999; Balsom et coll. 1992b; Hamilton et coll. 1991; Racinais et coll. 2007; Tomlin et Wenger 2002).

Deux études de Spencer et coll. (2006; 2008) utilisant un protocole de 6 fois 4 s de sprint entrecoupés de 21 s de récupération et ayant analysé l'évolution des métabolites cellulaires, confirment les résultats obtenus par Gaitanos et coll. (1993) et Dawson et coll. (1997).

3.1.2 Facteurs nerveux

L'évidence d'une fatigue liée à des facteurs métaboliques semble avoir exclu l'étude de l'influence des facteurs nerveux dans la fatigue liée à l'exercice intermittent dynamique. En conséquence très peu d'études se sont intéressées à cette problématique. La mesure de l'activité électromyographique (EMG) permet d'estimer la part des facteurs nerveux dans

la fatigue. Le signal EMG peut être traité de façon globale par la méthode RMS (Root-Mean Square), le résultat de ce traitement témoignant du niveau d'activité du muscle. L'analyse spectrale de ce même signal nous donnera une fréquence moyenne du signal (MPF, Mean Power Frequency) qui témoignerait lors de l'exercice maximal, d'une diminution de la vitesse de conduction des fibres musculaires (*e.g* De Luca 1997; Farina et coll. 2004).

Plusieurs études rapportent une diminution simultanée de la performance (pic ou moyenne) et de l'activité RMS lors d'exercice de sprints répétés (Billaut et Smith 2010; Mendez-Villanueva et coll. 2012; Mendez-Villanueva et Hamer 2008; Mendez-Villanueva et Hamer 2007; Racinais et coll. 2007). Les études de Billaut et coll. (2010) et Mendez-Villanueva et coll. (2008) montrent une corrélation entre la diminution du travail total fourni et de l'activité EMG intégrée. En accord avec les études de Hautier et coll. (2000; 1998) (15 fois 5 s de sprint sur bicyclette ergométrique, 25 s de récupération), Racinais et coll. (2007) n'observent pas de variation significative de l'activité RMS moyenne du VL (10 sprints de 6 s sur bicyclette ergométrique, récupération 24 s). Néanmoins, Racinais et coll. (2007) observent une diminution concomitante de l'activité RMS du VL (-12,8 %) et de la puissance (-10,8 %) lors des 2^{ème} et 3^{ème} coup de pédale. Bien que l'hypothèse d'une incapacité du système nerveux central à activer complètement les muscles soit envisageable, il est aussi possible que la diminution de la RMS soit la conséquence de mécanismes régulateurs de la commande nerveuse. En effet, l'exercice de haute intensité est généralement associé à une inhibition de la commande nerveuse et une diminution de la fréquence d'activation (Bigland-Ritchie & Lippold, 1979) en vue de protéger le muscle et ainsi prévenir une fatigue périphérique plus importante (« muscle wisdom ») (Enoka et Stuart, 1992). Lors de ce type d'exercice, l'accumulation dans le milieu extracellulaire de métabolites tels que le lactate (Rotto & Kaufman, 1988), les ions hydrogènes (H⁺) (Sinoway et coll., 1989 ; Victor, Bertocci, Pryor, & Nunnally, 1988) et le potassium K⁺ (Rybicki, Waldrop, & Kaufman, 1985) libéré pendant les contractions entrainerait une stimulation des fibres nociceptive afférentes de type III et IV (Garland, 1991 ; Garland & McComas, 1990). L'activation de ces fibres va alors avoir pour conséquence d'inhiber l'activation musculaire, traduite par une diminution du signal RMS. L'analyse précise des causes responsables de la diminution du signal RMS nécessite l'utilisation de l'électros-

timulation et l'analyse de l'onde M. L'onde M est la sommation de l'ensemble des potentiels d'actions des unités motrices évoquée par stimulation électrique du nerf à une intensité maximale, correspondant au recueil de l'activité synchrone de toutes les unités motrices du muscle appréciée par l'activité EMG. L'analyse de cette onde M nous renseigne sur la propagation du potentiel d'action neuromusculaire ainsi que sur l'excitabilité musculaire (Fuglevand et coll. 1993). Une diminution de l'amplitude et/ou un allongement de la durée de l'onde M indique une altération de l'excitabilité de la cellule musculaire et/ou du couplage excitation-contraction.

Les études de Racinais et coll. (2007) et Perrey et coll. (2010) ont analysé le signal EMG lorsqu'on impose au muscle une stimulation électrique, surimposée ou non à une CMV, et destinée à quantifier la part de la fatigue d'origine centrale. La comparaison de ces mesures, réalisées avant et après la répétition de sprints sur bicyclette ergométrique (10 sprints de 6 s, 30 s de récupération) dans l'étude de Racinais et coll. (2007), mettent en évidence une fatigue d'origine centrale (diminution de l'activation volontaire du VL (3 %) et diminution de l'intensité de la stimulation nerveuse de ce muscle de 14,5 %). Perrey et coll. (2010) ont analysé la fatigue des fléchisseurs plantaires à l'issue de 12 sprints de 40 m entrecoupés de 30 s de récupération. Leurs résultats confirment une faible diminution de l'activation volontaire (2,7 %) et une diminution de l'activation musculaire de l'ordre de 20 %. Les résultats de cette dernière étude confirment la part importante de la fatigue périphérique lors de la répétition de sprints. D'autre part, Mendez-Villanueva et coll. (2007) observent également une diminution de la MPF du VL, suggérant une fatigue d'origine périphérique, au cours d'une série de 10 sprint de 6 s (récupération 30 s) mais ce résultat n'est pas discuté. La diminution de MPF peut être liée à la diminution de la vitesse de conduction des potentiels d'actions le long des fibres musculaires impliquées dans la production de force (Juel, 1988). Cette diminution serait causée par une diminution du pH consécutive à une augmentation de la concentration en H⁺ intracellulaire ainsi qu'à une augmentation des concentrations de lactate musculaire, de pyruvate et de Pi au niveau intracellulaire et/ou de K⁺ au niveau extracellulaire (De Luca, 1997 ; Juel 1988).

Un déterminant important de la fatigue lors de la répétition de sprints est la performance initiale réalisée sur le test. La majorité des études rapportent une corrélation positive entre la diminution de performance au cours d'un test de répétition de sprints et la performance

initiale (Mendez-Villanueva et Hamer. 2008 ; Bishop et coll. 2003 ; Hamilton et coll. 1991 ; Yanagiya et coll. 2003). Les sujets qui réalisent une performance initiale supérieure auraient des perturbations métaboliques plus importantes, ce qui aurait pour conséquence une diminution de performance plus importante (Gaitanos et coll. 1993).

3.2 Facteurs physiologiques associés à l'aptitude à répéter des sprints

Bogdanis et coll. (1996a) ont demandé à 8 sujets de réaliser 2 sprints : le premier d'une durée de 30 s était espacé par 4 min de récupération d'un deuxième sprint qui durait soit 10 soit 30 s. Des biopsies ont été réalisées pour suivre l'évolution de [PCr]. Les résultats de cette étude démontrent une relation significative entre le % de PCr resynthétisé pendant la récupération et la vitesse de pédalage ainsi que la puissance produite pendant les 10 premières secondes du second sprint ($r = 0,91 ; P < 0,01$ et $r = 0,84 ; P < 0,05$ respectivement). Mendez-Villanueva et coll. (2012) ont étudié la récupération de la puissance musculaire lors de deux séries de sprints répétés (10 sprints de 6 s – 30 s de récupération, 6 min de récupération passive, 5 sprints de 6 s). Leurs résultats démontrent que la quantité de PCr resynthétisée pendant la récupération de 6 min est corrélée avec le travail total réalisé sur la seconde série de sprints ($r = 0,79 ; P < 0,05$). Enfin, Spencer et coll. (2006) observent également une corrélation entre la diminution de puissance lors d'une série de 6 fois 4 s de sprint sur bicyclette ergométrique et le % de resynthèse de PCr à l'issue des périodes de récupération de 21 s active ou passive ($r = -0,59 ; P = 0,03$ et $r = -0,81 ; P = 0,04 ;$ respectivement). Les résultats de ces études semblent indiquer que la resynthèse de la PCr pendant les phases de récupération est un facteur déterminant du maintien de la performance lors de l'exercice intermittent.

Comme le montre la figure 3, la PCr joue un rôle de navette en transférant les phosphates à haute énergie produits dans la mitochondrie par le métabolisme aérobie ou dans le cytoplasme par la voie anaérobie lactique jusqu'aux myofibrilles, lieu de leur utilisation (Meyer 1984). De plus, lors de l'exercice, les stocks de PCr situés dans la cellule jouent un rôle de tampon permettant ainsi, instantanément mais brièvement, de maintenir le taux de resynthèse de l'ATP au début de l'exercice et à chaque changement d'intensité (e.g. Wallimann et coll. 2011).

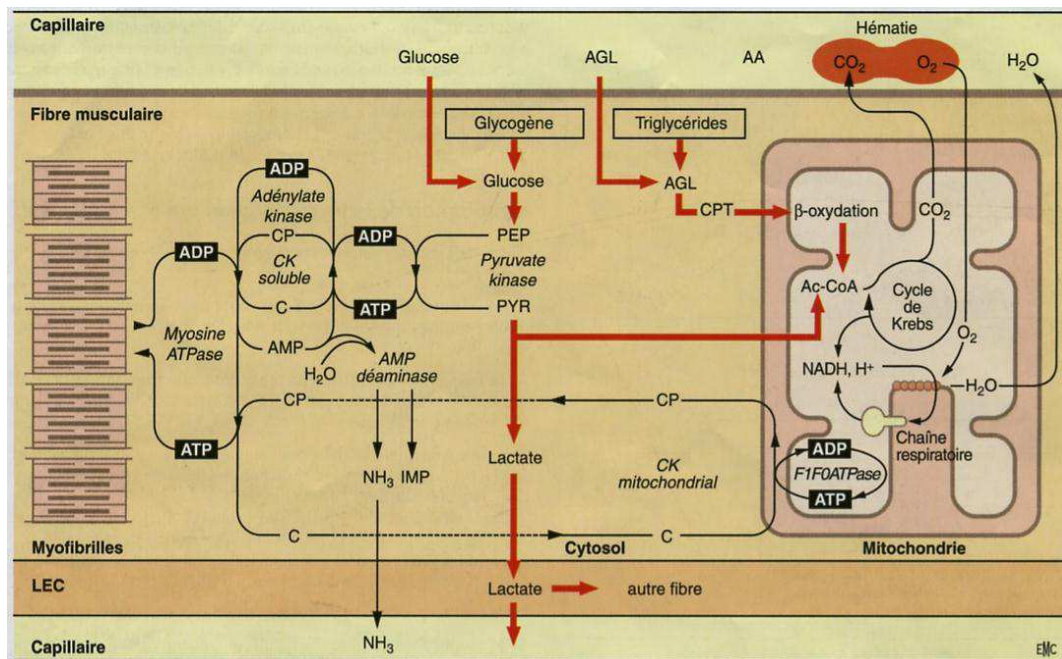


Figure 3 : Présentation simplifiée de l'organisation du métabolisme musculaire nécessaire au renouvellement de l'ATP utilisé pour la contraction. (Tiré de l'article de Denis et Lacour 1998)

Suite à un exercice intense, la resynthèse de la PCr peut être modélisée mathématiquement par une fonction exponentielle. Pour des conditions d'exercice ne modifiant pas de façon significative le pH intra musculaire, une fonction mono-exponentielle décrit correctement le phénomène. Lorsque le pH intramusculaire diminue significativement, la courbe de récupération de la PCr est décrite par une fonction bi-exponentielle (*e.g.* Arsac et coll. 2004; McMahan et Jenkins 2002). Harris et coll. (1976) ont analysé la resynthèse de PCr à l'issue d'exercices dynamiques et isométriques épuisants. Les résultats démontrent un $t_{1/2}$ de la phase rapide de la resynthèse de 21 s suite à un exercice dynamique et de 22,5 s suite à un exercice isométrique. Le $t_{1/2}$ de la phase lente a été calculé à 170 s et les auteurs observent que la quantité de PCr resynthétisée à 2 et 4 min est plus faible à l'issue de l'exercice isométrique épuisant. Ces auteurs sont les premiers à avoir mis en évidence le rôle indispensable de la voie aérobie dans la resynthèse de la PCr. La phase rapide de la resynthèse de la PCr serait ainsi uniquement limitée par la disponibilité en O_2 dans le muscle et la phase lente par le pH intra musculaire (*e.g.* McMahan et Jenkins 2002). En conclusion, dans le cadre de l'exercice intermittent dont les périodes de récupération sont inférieures à la durée de la phase rapide (environ 45 s), c'est la disponibilité en O_2 qui détermine la quantité de PCr resynthétisée.

L'étude de la disponibilité en O_2 a été facilitée par l'évolution technologique qui a mis à disposition des chercheurs un outil capable de mesurer la saturation du muscle en O_2 : le NIRS (spectromètre proche infra-rouge). Il a été démontré que la re-oxygénation musculaire mesurée avec le NIRS présente des cinétiques de récupérations identiques à la re-synthèse de la PCr (Hamaoka et coll. 1996; Kime et coll. 2003; McCully et coll. 1991). De plus, Hamaoka et coll. (2003) démontrent une relation significative entre le taux de de-oxygénation et la diminution de [PCr] exprimée en % de la valeur de repos pendant un exercice intermittent de 5 s (récupération de 5 s) représentant 50 % de CMV. Ce résultat indique qu'une de-oxygénation importante pendant l'exercice est associée à une déplétion importante de la PCr. En conséquence, l'analyse de la de-oxygénation et de la re-oxygénation est souvent utilisée pour analyser indirectement le métabolisme de la PCr.

Lors de l'exercice de sprints répétés, les études démontrent que la de-oxygénation est constante pendant les sprints et ce, dès le premier sprint (10 sprints de 6 s, 30 s de récupération, Racinais et coll. 2007 et 10 sprints de 10 s, 30 s de récupération, Billaut et Buchheit 2013 et Smith et Billaut 2010) alors que l'oxygénation musculaire diminue dès le premier sprint. Les auteurs concluent qu'en dépit de la diminution de l'oxygénation du muscle ce dernier extrait une quantité constante d' O_2 . Pendant la période de récupération consécutive aux sprints, la re-oxygénation permet de maintenir le niveau d'oxygénation musculaire dans les études conduites par Billaut (Billaut et Buchheit 2013; Smith et Billaut 2010). Par contre, dans l'étude de Racinais et coll. (2007), la période de récupération semble insuffisante pour maintenir l'oxygénation musculaire et les résultats démontrent une diminution progressive de l'oxygénation musculaire au fil des sprints. Il semblerait que l'entraînement en endurance (entraînement intermittent court, 2 fois par semaine et entraînement continu 1 à 2 fois par semaine ; pendant 8 semaines) permettrait d'accélérer la ré-oxygénation musculaire lors d'un exercice de répétition de sprint (Buchheit et Ufland 2011). L'amélioration de la re-oxygénation musculaire, via un entraînement adapté, pourrait permettre une resynthèse de la PCr plus rapide et ainsi un meilleur maintien de la puissance lors d'exercices de répétition de sprints, mais il n'existe aucun consensus sur l'importance de ce facteur sur la capacité à répéter des sprints (Buchheit et coll. 2011) Dans le contexte de la répétition de sprints et du maintien de la performance, le métabolisme aérobie intervient à deux niveaux. Pendant la contraction, on peut supposer qu'une

$\dot{V}O_2$ plus importante entraînera une moindre sollicitation des voies anaérobies, dont le fonctionnement est associé à l'apparition de la fatigue à très court terme. En accord avec cette hypothèse, Dupont et coll. (2005) ont démontré qu'une constante de temps de la composante rapide de $\dot{V}O_2$, déterminée lors d'un exercice sous-maximal, était associée à une moindre diminution de performance lors d'une série de 15 sprints de 40 m entrecoupés de périodes de récupération de 25 s. Ces résultats ont été confirmés par l'étude de Rampinini et coll. (2009) réalisée sur des footballeurs professionnels et amateurs. Pendant la récupération entre les sprints, la resynthèse de la PCr est réalisée grâce à l'hydrolyse de l'ATP resynthétisé en condition aérobie. En conséquence, plus la $\dot{V}O_2$ sera importante sur une période de récupération donnée plus importante sera la quantité de PCr resynthétisée. L'étude de Dupont et coll. (2010) démontre que la diminution de performance, lors de 7 sprints de 30 m entrecoupés de périodes de récupération de 20 s, est positivement corrélée à la constante de temps de la diminution de la $\dot{V}O_2$ à l'issue d'un exercice épuisant à 120 % de VMA. Ces résultats contrastent avec ceux obtenus par Buchheit et coll. (2012) sur une population plus importante et moins homogène (71 joueurs de différents sports collectifs). Des études complémentaires sont nécessaires pour démontrer l'importance des caractéristiques de la cinétique d' O_2 dans le maintien de la performance lors de sprint répétés.

D'autre part, différentes études ont démontré une relation significative entre le débit maximal de consommation d'oxygène ($\dot{V}O_{2\max}$) et la diminution de performance lors de sprints répétés (Bishop et Edge 2006; Bishop et Spencer 2004; da Silva et coll. 2010; Dupont et coll. 2005; Rampinini et coll. 2009; Tomlin et Wenger 2002; Dupont et coll. 2010; Buchheit et coll. 2012). Cependant d'autres études ne démontrent aucune relation significative entre ces paramètres (Bishop et coll. 2003; Castagna et coll. 2007; Glaister et coll. 2006; Wadley et Le Rossignol 1998). L'analyse de la littérature suggère que $\dot{V}O_{2\max}$ pourrait ainsi être un facteur limitant mais non déterminant de la capacité à répéter des sprints et il semblerait donc important de développer un niveau « optimal » plutôt que maximal de $\dot{V}O_{2\max}$ (Bishop et coll. 2011).

La mesure de $\dot{V}O_{2\max}$ permet d'apprécier la puissance maximale de resynthèse de l'ATP

par la voie aérobie qui détermine l'intensité d'exercice associée avec la performance lors d'épreuve de fond ou de demi-fond. Les explications concernant l'influence de $\dot{V}O_{2max}$ sur l'aptitude à répéter des sprints sont superficielles dans la littérature. D'après les auteurs, cette relation confirme l'influence de la voie aérobie dans l'aptitude à répéter les sprints. $\dot{V}O_{2max}$ est déterminé par deux paramètres : le débit cardiaque maximal (paramètre central) et la différence artério-veineuse maximale (qui correspond à l'extraction maximale d'O₂ par les muscles actifs, paramètre périphérique) (e.g. di Prampero 2003; Wagner 2000). L'équipe de Haseler apporte un éclairage intéressant sur le lien entre $\dot{V}O_{2max}$ et l'aptitude à répéter des sprints. Les études réalisées par cette équipe démontrent que chez les sujets entraînés, c'est la disponibilité en O₂ (i.e. le débit cardiaque) qui limite la resynthèse de PCr, dans la mesure où la resynthèse de PCr est augmentée en condition d'hyperoxie (Haseler et coll. 1999). Par contre chez le sujet sédentaire, dans les mêmes conditions d'expérience, les auteurs démontrent qu'il y aurait une limitation métabolique à l'utilisation de l'O₂ pour la resynthèse de la PCr (i.e. capacité oxydative limitée, Haseler et coll. 2007). L'étude de Takahashi et coll. (1995) semble confirmer ce résultat. En effet, ces auteurs ont comparé deux groupes : un groupe de 5 coureurs entraînés et un groupe contrôle de 7 sujets, lors d'un exercice d'extension de la jambe dont l'intensité variait de légère à épuisante. Les résultats démontrent une corrélation significative entre $\dot{V}O_{2max}$ et la constante de temps de resynthèse de PCr dans le groupe entier pour chaque intensité d'exercice. Néanmoins cette relation n'est significative, pour le groupe contrôle, que pour les faibles intensités d'exercice (légère et modérée). Cette absence de relation dans le groupe contrôle suggère une limitation métabolique de l'utilisation de l'O₂.

En résumé, l'analyse de la littérature, en accord avec la revue de question de Grassi (2000), démontre que ce serait la capacité oxydative plutôt que $\dot{V}O_{2max}$ qui limiterait l'utilisation de l'O₂ par les muscles actifs et donc la resynthèse de la PCr pendant la phase de récupération entre les sprints. Le seuil lactique est considéré comme un témoin indirect de la capacité oxydative. Bogdanis et coll. (1996a) démontrent en effet que le seuil lactique est corrélé au taux de resynthèse de la PCr. De plus, Bishop et coll. (2004) observent quant à eux une corrélation négative entre le seuil lactique en valeur absolue et la diminution de performance. On peut supposer que la relation entre $\dot{V}O_{2max}$ et l'aptitude à répéter les

sprints observée par certains auteurs serait en fait une relation indirecte liée aux effets simultanés d'un entraînement adapté sur ces deux paramètres (Buchheit et Ufland 2011; Daussin et coll. 2008).

Enfin, l'intensité de la récupération semble influencer de façon significative la resynthèse de la PCr. Différentes études ont montré que la diminution de performance était plus importante lorsqu'une récupération active était effectuée entre les sprints (Buchheit et coll. 2009; Spencer et coll. 2008; Spencer et coll. 2006). Cette diminution de performance est associée à une tendance de moindre resynthèse de PCr lors de la récupération active ($P = 0,06$; Spencer et coll. 2006) et semble indépendante de l'intensité de la récupération dans la mesure où cette dernière est faible (Spencer et coll. 2008). Buchheit et coll. (2009) observe également une diminution de l'oxygénation musculaire, une $\dot{V}O_2$ plus importante et une $[La]_s$ supérieure à l'issue de la récupération active. Ce dernier résultat est en accord avec l'étude de Spencer et coll. (2006) qui observe une augmentation significative de $[La]_m$ à l'issue de la récupération active. Ainsi, ce dernier résultat indique que la fatigue observée lors de la répétition de sprints n'est pas exclusivement liée à la diminution de la PCr et à l'accumulation du P_i mais qu'elle pourrait également être liée à l'accumulation des H^+ survenant lors de la sollicitation de la glycolyse dont témoigne l'accumulation de lactate dans le sang et dans le muscle.

Bishop et coll. sont à notre connaissance les seuls avoir étudié le lien entre la concentration musculaire et sanguine en H^+ , la capacité tampon du muscle et le maintien de la performance lors de sprints répétés. Dans une étude publiée en 2003, ces auteurs démontrent une relation significative entre la diminution de performance lors de sprints répétés et le pH sanguin (Bishop et coll. 2003). Dans une étude de 2004 (Bishop et coll. 2004) une corrélation entre la capacité tampon du muscle et le maintien de la performance lors d'une série de sprints (5 sprints de 6 s, 24 s de récupération) est mise en évidence. Ces deux études mettent en évidence l'importance de l'élimination des H^+ musculaire et sanguin pour le maintien de la performance lors de sprints répétés.

3.3 Fatigue et exercice intermittent statique

La revue de littérature démontre que les études consacrées à la physiologie de l'exercice intermittent concernent uniquement l'exercice dynamique. Le rugby se démarque des autres sports collectifs par l'affrontement direct des joueurs autour de phases de jeu statiques ou quasi statiques dans les mêlées, les rucks ou les mauls. Milburn a été l'un des premiers à s'intéresser à cette phase de jeu (*e.g.* Milburn 1993). Cet auteur mesure des forces pics de 7952 N lors de l'impact de la mêlée et des forces moyennes de 5761 N lors de la poussée, dans un groupe d'avant de niveau élite (Milburn 1990). L'évolution du rugby au cours des décennies a eu un impact significatif sur les caractéristiques physiques des joueurs. Ainsi Preatoni et coll. (2013) mesurent des forces pic de 16500 ± 1400 N à l'impact et des forces moyennes de 8300 ± 1000 N lors de la poussée en mêlée, dans un groupe d'avants de niveau international en 2012. Les premières lignes produisent en moyenne 42 % de cette force totale, les 2^{ème} lignes 37 % et enfin et les 3^{ème} lignes ailes ne participent plus qu'à 25 % de la production de force totale (*e.g.* Milburn 1993). En conséquence, les joueurs les plus performant individuellement en mêlée sont les joueurs les plus lourds et possédant une masse musculaire importante (mésomorphes, Quarrie et Wilson 2000).

L'analyse de la littérature démontre que lors des actions statiques, notamment lors des mêlées, les joueurs réalisent des contractions de type isométriques (ou quasi isométriques) de hautes intensités voire d'intensité maximale. La répétition de ces efforts spécifiques au rugby n'a cependant jamais été étudiée. Seuls Jougla et coll. (2010) ont utilisé des actions spécifiques au rugby comme des poussées en mêlée afin d'étudier l'effet du type de récupération lors d'un exercice de répétition de tâches spécifique au rugby. Par contre, le cas de la contraction isométrique a été étudié dans la littérature par de nombreux auteurs du fait qu'elle présente certaines particularités comparées aux contractions dynamiques.

3.3.1 Cas particulier de la contraction isométrique

3.3.1.1 *Coût énergétique de la contraction isométrique*

L'étude de Fenn démontre dès 1923 (Fenn 1923) que le coût métabolique de la contraction isométrique est plus faible que celui de la contraction concentrique. Ce phénomène appelé « effet Fenn » démontre que le taux de détachement des ponts entre l'actine et la myosine et donc par conséquent l'hydrolyse de l'ATP est plus faible lorsque le muscle n'a pas la possibilité de se raccourcir. Les résultats de l'étude originale de Fenn ont été confirmés par Ryschon et coll. (1997). Ces auteurs ont comparé le coût métabolique des contractions isométriques, concentriques et excentriques lors de la contraction de deux muscles, le *tibialis antérieur* et l'*extensor digitorum*, stimulés électriquement de façon cyclique (5 s d'effort – 5 s de récupération) pendant 5 min. Les variations d'ATP, de PCr, de P_i ainsi que de pH ont été déterminées grâce à la ^{31}P -NMR. Les résultats démontrent que, pour un même moment de force et une même durée de contraction, la dégradation de PCr est plus importante suite à une contraction dynamique que lors d'une contraction isométrique (Ryschon et coll. 1997). Elder et coll. (2006) ont mesuré $\dot{V}O_2$ lors de 3 min d'exercice d'extension de la jambe soit en dynamique soit en isométrique. En accord avec les conclusions des études précédentes leurs résultats démontrent que la $\dot{V}O_2$ rapportée au moment de force pour la contraction isométrique est inférieur d'environ 30 % à celui calculé pour la contraction concentrique.

3.3.1.2 *Fatigue et exercice isométrique*

En dépit d'un coût énergétique plus faible pour un moment de force donné, la performance d'endurance est beaucoup plus faible lors de l'exercice isométrique que lors de l'exercice concentrique. Dias da Silva et Goncalves (2006) ont mesuré le temps d'épuisement au cours d'un exercice d'extension de la jambe, en modalité dynamique ou isométrique, pour une même intensité relative correspondant à la charge dynamique maximale et la CMV respectivement. Les résultats démontrent que le temps d'épuisement est significativement inférieur dans le cas de l'exercice isométrique : d'environ 30 et 55 % pour 20 et 50 % de la charge maximale respectivement. Cette observation est en accord avec les résultats

proposés par l'étude de Ahlborg et coll. (1972) qui démontrent que la relation entre le temps d'épuisement et la force de contraction isométrique d'extension de la jambe est décrite par un polynôme du 3^{ème} degré. Le temps de maintien est théoriquement infini pour des forces inférieures à 20 % de la CMV, se situe aux alentours de 100 s entre 30 et 40 % de la CMV et tombe en dessous de 50 s à partir de 60 % de CMV.

Cette fatigabilité importante est liée au fait que, pendant la contraction isométrique, le flux sanguin au sein du muscle est modifié. La pression intra musculaire augmente proportionnellement à la force de contraction isométrique (Sadamoto et coll. 1983; Sjøgaard et coll. 1988) et cette relation est spécifique du muscle étudié (Sadamoto et coll. 1983). Selon les auteurs, la différence entre les muscles serait liée à l'anatomie des muscles : pour un niveau de force donné, la pression intra musculaire serait plus faible si le muscle est constitué de fibres disposées en parallèle. Lorsque la pression intramusculaire égale la pression artérielle au niveau du muscle, on observe une occlusion de la circulation sanguine. Cette occlusion intervient à différents niveaux de force selon les muscles étudiés. L'étude de Sadamoto et coll. (1983) démontre que pour le *Vastus Lateralis* (VL) l'occlusion intervient à 64 % de la CMV contre 50 % pour le *Rectus Femoris* (RF).

C'est la perturbation du flux sanguin, voire l'occlusion de ce dernier, qui serait responsable de la fatigue prématurée observée lors de la contraction isométrique soutenue (Ahlborg et coll. 1972; Cerretelli et coll. 1976; Kimura et coll. 2006; Sjøgaard et coll. 1988). La perturbation du flux sanguin diminue la disponibilité en O₂ ce qui a pour conséquence de solliciter les voies métaboliques anaérobies pour la resynthèse de l'ATP (Karlsson et Funderburk 1975). Selon Ceretelli et coll. (1976) la fatigue survient lorsque les stocks de PCr sont épuisés et que l'on a atteint la capacité maximale de la glycolyse. Cet auteur note par ailleurs que la fatigue lors de l'exercice intermittent isométrique est moindre si les périodes de récupération sont adaptées. Néanmoins, Kimura et coll. (2006) montrent que la disponibilité en O₂ intramusculaire peut contribuer à la demande énergétique pendant la contraction jusqu'à épuisement des stocks en O₂ intramusculaire. En effet, lorsque le flux sanguin est interrompu lors d'une contraction isométrique de haute intensité, la respiration mitochondriale n'est pas stoppée. Ces auteurs démontrent lors de contractions isométriques de haute intensité que la contribution relative à la production d'ATP de la filière aérobie, grâce à l'O₂ disponible dans le muscle, diminue quand l'intensité de la

contraction augmente (19,0 % à 30 % CMV, 17,3 % à 50 % et 7,1 % du taux de production d'ATP total à 70 %). Cette sollicitation de la voie aérobie permettrait de préserver les stocks de PCr. Selon Kimura et coll. (2006) l'O₂ serait consommé dès les premières secondes de la contraction isométrique. Cette consommation d'O₂ précoce dès les premières secondes (1,5 à 2 s après le début) d'exercice a été confirmée lors d'une CMV par Quaresima et coll. (2006) et Cettolo et coll. (2007). L'étude de Cettolo et coll. (2007) démontre par ailleurs que cette aptitude à utiliser rapidement l'O₂ lors d'une CMV serait moins bonne chez les sujets entraînés en force.

Selon la revue de question proposée par Place et coll. (2009) les mécanismes de fatigue associés à l'exercice isométrique varient en fonction de l'intensité et du mode de contraction (intermittent ou continu). La fatigue d'origine centrale serait à l'origine de la fatigue observée lors de contractions continues de faible intensité (inférieur à 20 % de CMV ; e.g Taylor et Gandevia 2008, Place et coll. 2010). La fatigue liée à des facteurs métaboliques est observée suite à des tetani répétés ou à une contraction continue d'une intensité supérieure à 30 % de la CMV. Dans une étude récente, Pereira et coll. (2009) ont analysé simultanément la de-oxygénation cérébrale et celle du VL lors d'un exercice maximal d'extension de genou maintenu jusqu'à épuisement. Leurs résultats démontrent que l'oxygénation cérébrale augmente systématiquement pendant la contraction alors que le volume sanguin et l'oxygénation musculaire diminuent significativement. Les auteurs concluent que la fatigue observée n'est pas due à un déficit d'activation d'origine supra spinal mais qu'elle est vraisemblablement d'origine périphérique et liée à des facteurs comme la déplétion des stocks d'ATP et de PCr, l'accumulation de métabolites et/ou la diminution de l'oxygénation musculaire.

Différentes études ont analysé la fatigue neuromusculaire lors de contractions isométriques répétées d'intensité sous maximale (entre 30 et 50% de CMV) (Bigland-Ritchie et coll. 1986; Saugen et coll. 1997; Vøllestad et coll. 1988). Bigland Ritchie et coll. (1986) ont étudié la répétition de contractions isométriques (6 s à 50 % de CMV; 4 s de repos) sur le quadriceps et le muscle soléaire. Saugen et coll. (1997) ainsi que Vøllestad et coll. (1988) ont mis en place des protocoles similaires sur le quadriceps pour des intensités correspondant à 40 et 30% de la CMV respectivement. Saugen et coll. (1997) démontrent, d'une part, que la force diminue peu sur les premières répétitions (entre 20 et 30 %) alors

que les variations de [PCr] et de [Pi] sont importantes. D'autre part, pendant la récupération le Pi retrouve des valeurs proches des valeurs initiales en environ 5 min après l'arrêt de l'exercice alors qu'il faut environ 30 min à la force pour retrouver sa valeur initiale. Les auteurs suggèrent donc que la déplétion de PCr ne serait pas à l'origine de la fatigue. Une diminution de force observée lors de la répétition de contractions isométriques d'intensité sous maximale est observée en dépit d'un niveau d'activation centrale préservé et de variations limitées des propriétés de l'onde M (Bigland-Richie et coll., 1986). La fatigue lors de l'effort isométrique intermittent d'intensité sous maximale serait alors principalement due à une défaillance de la capacité du muscle à générer de la force en raison d'une altération du couplage excitation-contraction, soit en raison d'une incapacité à propager le potentiel d'action dans le tubule T, soit en raison d'une altération de la libération du Ca^{2+} par le réticulum sarcoplasmique ou bien d'une incapacité à former les ponts actine-myosine (Vøllestad et coll., 1988).

Des études réalisées sur fibres isolées lors de contractions maximales répétées confirment cette hypothèse. Westerblad et Allen (1991) observent que la diminution de force est liée, soit à une altération de la libération du Ca^{2+} par le réticulum sarcoplasmique, soit à une diminution de la sensibilité des myofibrilles au Ca^{2+} . Bien que les causes sous-jacentes à ces mécanismes ne soient pas encore bien comprises, il a pu être établi que l'acidose a un effet limité sur le développement de la fatigue à température physiologique (Westerblad et coll. 1997) et la cause la plus probable semble être l'augmentation de la concentration en Pi issus de la dégradation de la PCr. Le Pi pourrait en effet jouer un rôle en inhibant les pompes Ca^{2+} du réticulum sarcoplasmique (Dahlstedt et coll. 2001; Duke & Steele, 2001).

3.3.2 Objectifs de l'étude 2

La revue de littérature démontre que lors d'une compétition de rugby la durée moyenne des actions est d'environ 3 s pour les activités dynamiques et 5 s pour les activités statiques. D'autre part, l'analyse de la littérature démontre des ratios moyens compris entre 1:4 et 1:10 pour les avants et 1:5 et 1:15 pour les arrières. La synthèse des résultats montre que, dans une configuration d'effort dynamique comme celle observée dans le rugby et

étudiée dans l'article de Balsom et coll. (1992, durée du sprint entre 2,6 et 4,5 s, récupération 30 s), la combinaison des durées de travail et de récupération entraîne une faible diminution de performance. La compréhension des facteurs limitant lors d'exercices de répétitions de sprints a fait l'objet d'une attention particulière au cours des dernières années et a permis la publication de plusieurs revues sur ce sujet (Girard et coll. 2011; Glaister 2005; Spencer et coll. 2005). L'analyse de la littérature suggère que lors d'exercice intermittent bref (inférieur à 5 s) et suivi d'une période de récupération d'au moins 20 s (ratio 1:4) la diminution de performance est essentiellement liée au fait que les stocks de PCr utilisés pendant l'effort ne seraient pas complètement resynthétisés pendant la récupération consécutive.

La particularité du rugby est que les avants effectuent 75 % du temps passé à haute intensité dans des actions de type statique. Ces phases de jeu, contre un adversaire direct, impliquent des contractions isométriques maximales ou quasi maximales (Duthie 2006). Néanmoins, l'analyse de la fatigue proposée pour l'exercice dynamique maximal répété ne peut pas s'appliquer à la répétition d'exercices isométriques d'intensité maximale. En effet, comme on l'a vu précédemment la contraction isométrique a un faible coût énergétique par rapport à la contraction dynamique. En dépit de cela, la fatigue intervient rapidement lors d'exercice de contraction isométrique soutenue à un niveau de force sous maximal en raison de l'occlusion du flux sanguin. La fatigue lors de l'exercice isométrique maximal répété simulant l'effort de poussée en mêlée n'a jamais été étudiée. C'est ce que nous proposons dans une deuxième étude.

Dans le cadre de la répétition d'efforts intenses, il semblerait que la capacité oxydative plutôt que $\dot{V}O_{2max}$, soit le facteur limitant de l'utilisation de l' O_2 par les muscles dont dépend la resynthèse de la PCr. Ainsi, l'objectif secondaire de notre deuxième étude est de tester l'hypothèse que le maintien de la performance lors de ce type d'effort est associé à la capacité oxydative estimée par la mesure de VLa4 exprimé en pourcentage de VMA (VLa4%).

ÉTUDE 1

Une nouvelle approche d'analyse de l'activité en rugby à XV.

Cette étude a fait l'objet d'un article accepté dans le Journal of Sport Sciences (annexe 1).

Lacome, M., Piscione, J., Hager, J.-P., & Bourdin, M.

A new approach to quantifying physical demand in rugby union.

Journal of sports sciences (2013)

<http://dx.doi.org/10.1080/02640414.2013.823225>

1. Objectifs de cette étude.

L'objectif principal de cette étude était de proposer une approche complémentaire de l'analyse de la tâche en rugby à XV en prenant en compte les limites actuelles des études précédentes : l'utilisation de seuils de vitesse individualisés ainsi que le calcul et l'analyse des accélérations. L'objectif secondaire était d'évaluer, à partir des différentes variables étudiées, la diminution de performance au cours de matchs internationaux.

2. Matériel et méthodes

2.1 Sujets.

L'activité de 30 joueurs du XV de France a été analysée. Afin de réaliser des comparaisons entre les postes, les joueurs ont été séparés en avants (Av) et arrières (Ar) et subdivisés en 4 groupes de positions en accord avec Deutsch et coll. (1998) : Piliers et 2^{ème} Lignes (P2L ; n = 9) ; Talons et 3^{ème} Lignes (T3L ; n = 8) ; Demi-ouverture et Centres (Centres ; n = 6) ; Ailiers et Arrières (AlAr ; n = 7).

En accord avec la littérature, les demis de mêlées (n = 2) ont été exclus de l'analyse en raison du nombre réduit de joueurs à ce poste et des sollicitations physiques particulières de ce poste (Deutsch et coll. 1998; Duthie et coll. 2005; Roberts et coll. 2008). Les caractéristiques anthropométriques et physiologiques de ces 30 joueurs sont listées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Caractéristiques anthropométriques et physiologiques des 4 groupes de poste (moyenne ± ET)

Groupe de Poste	Avants			Arrières		
	P2L (9)	T3L (8)	Avants (17)	Centres (6)	AlAr (7)	Arrières (13)
Age (année)	29,9 ± 3,3	27,4 ± 4,1	28,7 ± 3,8	25,9 ± 3,5	27,7 ± 3,4	27,1 ± 3,4
Taille (m)	1,88 ± 0,09	1,88 ± 0,05	1,88 ± 0,07	1,82 ± 0,05	1,83,9 ± 0,06	1,83 ± 0,05
Poids (kg)	112,4 ± 6,7	103,7 ± 7,5 a	108,3 ± 8,2	93,0 ± 14,6 a	90,9 ± 6,4 abc	94,0 ± 8,2 *
Masse Grasse (%)	17,5 ± 5,8	13,3 ± 4,7	15,5 ± 5,5	15,3 ± 5,8	11,4 ± 1,8	13,5 ± 4,8
VMA (km.h ⁻¹)	14,9 ± 0,5	16,1 ± 1,3	15,5 ± 0,8	15,4 ± 0,8	15,7 ± 0,9	15,4 ± 1,1
VLa4 (km.h ⁻¹)	12,2 ± 0,9	12,5 ± 1,4	12,3 ± 1,1	12,3 ± 0,8	13,2 ± 1,1	12,7 ± 0,9
VLa4%	82,0 ± 5,6	77,5 ± 4,9 d	79,9 ± 5,7	80,0 ± 3,6	83,5 ± 5,1	81,9 ± 4,7

(n) nombre de sujets. a Significativement différent des P2L (P<0,05) ; b Significativement différent des T3L (P<0,05) ; c Significativement différent des Centres (P<0,05) ; d Significativement différent des AlAr (P<0,05). * Significativement différent des Avants (P<0,05). VMA, Vitesse maximale aérobie ; VLa4, vitesse correspondant à une lactatémie de 4 mmol.l-1. VLa4%, Vitesse correspondant à une concentration en lactate sanguin de 4 mmol.l-1 (en % de VMA).

2.2 Protocole expérimental.

Les tests physiologiques ont été réalisés en Novembre au cours de la même matinée dans le cadre de la préparation physique des joueurs. La Fédération Française de Rugby (FFR) nous a autorisés à utiliser ces données dans le cadre de cette étude.

Cinq matchs à domicile ont été analysés *a posteriori*. Deux matchs (1 et 2) étaient des rencontres internationales comptant pour la tournée d'Automne 2009, les 3 autres matchs (3 à 5) se sont déroulés lors du Tournoi des Six Nations 2010. Les joueurs ayant joué au moins une mi-temps complète ont été inclus dans l'analyse. Cela représente un total de 67 fichiers d'analyse. Les résultats, le temps de jeu effectif ainsi que le nombre de fichiers analysés pour chaque match sont listés dans le tableau 8.

2.3 Evaluation physiologique de terrain.

VMA ainsi que la vitesse correspondant à une $[La]_s$ de 4 mmol.l^{-1} (VLa4) ont été déterminés lors d'un test incrémental adapté du test décrit par Léger et Boucher (Leger et Boucher 1980). Ce test est constitué de paliers de 3 min de course espacés d'une minute de récupération passive. La vitesse a été augmentée de 2 km.h^{-1} entre 8 et 12 km.h^{-1} puis de 1 km.h^{-1} à partir de 12 km.h^{-1} . Les joueurs étaient familiarisés avec le test proposé car c'est un test d'entraînement qu'ils réalisent régulièrement. Les tests se sont déroulés sur une piste extérieure en Tartan. Au cours du test, Fc a été enregistrée en continue grâce à un cardio-fréquencemètre (Polar Team 2, Kempele, Finland). VMA a été défini comme la vitesse correspondant à Fc max.

Pendant chaque période de récupération et 3 min après la fin du test, 20 microlitres de sang ont été prélevés au bout du doigt. $[La]_s$ a été mesuré avec un analyseur de lactate YSI 2300 (YSI Inc., Yellow Springs, OH, USA). VLa4 a été calculée par interpolation linéaire entre les deux mesures les plus proches et exprimé en % de VMA (VLa4%) (Bourdin et coll. 2004).

La masse grasse (MG) a été évaluée par absorptiométrie biphotonique à rayon X (D-XA) (Discovery W, Hologic Inc., Marlborough, MA, USA).

Tableau 8 : Résultats, temps de jeu effectif et nombre de fichiers analysés lors de chaque match.

Match	Résultat	Temps de jeu effectif (min)	Nombre de fichiers analysés (n)				Total :
			Avants		Arrières		
			P2L	T3L	Centres	AlAr	
1	20-13	38,7	4	4	2	3	13
2	12-39	36,8	4	4	3	3	14
3	33-10	44,5	4	4	3	3	14
4	46-20	37,7	4	4	3	2	13
5	12-10	44,8	4	4	3	2	13
Total :			20	20	14	13	67

2.4 Analyse des données vidéo.

L'enregistrement et le traitement des données vidéographiques étaient une prestation réalisée par Amisco Pro[®] à la demande de la FFR. Cette dernière nous a autorisés à exploiter ces données dans le cadre de cette étude.

Un système de suivi des joueurs semi-automatique (Amisco Pro[®], Sport universal Process, Nice, France) a été utilisé afin d'enregistrer l'activité de chaque joueur pendant le match. Six à huit caméras étaient placées sous le toit du Stade de France (Saint Denis, France). Ces caméras étaient calibrées et synchronisées entre elles. L'enregistrement des données vidéographiques a été effectué à une fréquence d'acquisition de 25 Hz et enregistré sur six ordinateurs pour une analyse *a posteriori*. Ces données sont traitées par le prestataire. Au final, le traitement donne pour chaque joueur la distance parcourue toutes les 0,1 s (10 Hz).

En accord avec Vigne et coll. (2010), les déplacements correspondant à des vitesses supérieures à VLa4 et les actions statiques étaient considérés comme travail (T) et les déplacements correspondant à une intensité inférieure à VLa4 comme récupération (R). Nous avons défini dans le logiciel Amisco Viewer[®] des catégories de vitesses de course correspondant à une intensité moyenne (MI : vitesse moyenne de course entre VLa4 et VMA) et à une intensité supramaximale (>VMA : vitesse moyenne de course supérieure à VMA). La distance totale ainsi que la durée et l'intensité moyenne ont été déterminées automatiquement en considérant les différentes catégories d'intensités définies ci-dessus à l'aide du logiciel d'analyse de match (Amisco Viewer[®], Sport universal Process, Nice, France). Les mêlées, les rucks et les mauls ont été classés en « activité statique ». Le système

Amisco Pro[®] ne permet pas d'identifier et de quantifier les activités statiques automatiquement de façon fiable. En conséquence, la participation active dans les phases statiques a été enregistrée de façon manuelle à partir du fichier vidéographique par un opérateur expérimenté. La reproductibilité de cette méthode d'analyse manuelle des activités statiques a été validée (Deutsch et coll. 2007; Deutsch et coll. 1998). La participation active dans une activité statique correspond au moment où l'épaule du joueur entre en contact avec un joueur constituant le ruck ou le maul jusqu'au moment où ce contact est rompu. Les actions de plaquage ou de combat dans lesquelles un joueur stoppe ou retient un adversaire tout en restant debout ont également été classées comme « activité statique ». Dans le but d'établir un profil d'activité représentatif pour chaque groupe de position, les données des 5 matchs ont été incluses pour l'analyse (Hughes et coll. 2001).

2.5 Calculs

Pour chaque fichier analysé, les ratios Travail:Récupération (T:R) ont été calculés en divisant la durée de la période de travail par la durée de la période de récupération suivante. Les résultats ont été rapportés au nombre total de ratio et exprimés en pourcentage. Les ratios ont ensuite été divisés en 3 groupes : inférieur à 1:4 ($T:R < 1:4$) ; compris entre 1:4 et 1 ($1:4 < T:R < 1$) et supérieur à 1 ($TR > 1$). Pour chaque groupe, les T:R ont ensuite été reclassés en fonction de la durée (< 2 s, 2-4 s et > 4 s) et de l'intensité de la période de travail.

Les accélérations ont été calculées à partir des données de distances échantillonnées à 10 Hz en utilisant une double dérivation. Un filtre Butterworth passe bas de second ordre (fréquence de coupure : 1 Hz) sans décalage de phase a été utilisé après chaque dérivation. D'après les concepteurs du système Amisco Pro[®], l'erreur moyenne de mesure est de un pixel, soit de 75 mm (entre 50 mm et 100 mm selon la position du joueur par rapport à la caméra). Afin d'évaluer la précision du calcul de l'accélération, nous avons utilisé la méthode de Monte Carlo. Cette méthode nous a permis de générer des fichiers de 30 s contenant des valeurs de déplacement (échantillonné à 10 Hz) bruitées en considérant un écart type de 75 mm qui correspond à l'erreur de mesure moyenne. Entre 10 et 500 jeux de données de 30 s ont été générés pour vérifier la convergence de l'écart type. Nous avons

ensuite calculé l'écart type moyen sur 10 jeux de données bruitées afin d'évaluer la précision et la reproductibilité des calculs sur la vitesse et l'accélération. L'écart type moyen a été évalué à $0,17 \text{ m.s}^{-1}$ et $0,34 \text{ m.s}^{-2}$ pour la vitesse et l'accélération respectivement.

Les accélérations atteignant au moins 1 m.s^{-2} pendant une durée supérieure à 0,5 s ont été prises en compte dans l'analyse. En accord avec les travaux d'Osgnach et coll. (2010), ces données ont été réparties en 3 groupes : 1 à 2 m.s^{-2} ; 2 à 3 m.s^{-2} et supérieures à 3 m.s^{-2} . Les accélérations ont ensuite été classées en fonction des catégories d'intensité correspondant à la vitesse moyenne de course calculée sur la phase d'accélération: Arrêt – Marche ($0-7 \text{ km.h}^{-1}$) ; Jogging ($7 \text{ km.h}^{-1} - \text{Vla4}$) ; MI et $> \text{MAV}$.

2.6 Analyses statistiques

Les statistiques ont été réalisées grâce au logiciel JMP (SAS, Cary, North Carolina, USA). Les valeurs sont présentées sous la forme : moyenne \pm écart-type.

Le test de Shapiro-Wilk a démontré que les paramètres étudiés n'étaient pas normalement distribués. De ce fait, des tests non paramétriques ont été utilisés. Les différences entre les groupes ainsi qu'entre la 1^{ère} et la 2^{ème} mi-temps (MT1 et MT2) ont été testés grâce au test de Wilcoxon (non appareillé et appareillé respectivement).

Le seuil de significativité a été fixé à $P < 0,05$.

3. Résultats

3.1 Caractéristiques anthropométrique et physiologique.

Les joueurs constituant les 4 groupes de poste ont des tailles similaires. Cependant, les avants ont une masse corporelle supérieure à celle des arrières. Il n'y a pas de différence significative entre les groupes concernant le pourcentage de MG, VMA, VLa4 et l'âge. VLa4% est significativement plus faible dans le groupe T3L que dans le groupe AlAr.

3.2 Temps total de travail et distance parcourue.

Les joueurs des groupes P2L et T3L présentent un temps total de travail similaire ($11,9 \pm 1,3$ et $11,2 \pm 2,6$ min, respectivement). Les Centres ont un temps total de travail de $10 \pm 1,4$ min, similaire à celui des T3L, inférieur à celui des P2L ($P < 0,05$) et supérieur à celui des AlAr ($7,1 \pm 1,3$ min ; $P < 0,05$). Ces derniers démontrant le temps total de travail le plus faible.

Les Ar parcourent une distance totale supérieure à celle parcourue par les Av (7944 ± 659 m vs 7006 ± 356 m respectivement ; $P < 0,05$). Les P2L parcourent la distance la plus faible (6935 ± 334 m). Les T3L parcourent une distance totale similaire à celle parcourue par les AlAr (7215 ± 266 et 7764 ± 789 m, respectivement). Les T3L parcourent une distance totale plus faible que celle parcourue par les centres (8079 ± 539 m ; $P < 0,05$).

3.3 Ratios Travail:Récupération (T:R)

Le nombre total de ratio par match est significativement inférieur chez les Ar par rapport aux Av ($137,1 \pm 28,8$ et $178,7 \pm 25,7$ respectivement ; $P < 0,05$). Le nombre total de ratios est similaire pour les P2L et les T3L ($185,9 \pm 20,3$ et $172,2 \pm 21,3$ respectivement) et significativement supérieur chez les Centres comparés aux AlAr ($155,4 \pm 13,9$ et $118 \pm 16,1$ respectivement). Les centres démontrent un nombre total de ratio inférieur à celui des P2L ($P < 0,05$). Le nombre total de ratios est inférieur chez les AlAr lorsqu'ils sont comparés aux T3L ($P < 0,05$).

Afin de faciliter la lecture, les données supérieures à 5 % ont été grisées dans le tableau 9. Globalement, comme illustré dans le tableau 9 et synthétisé dans le tableau 10, les Av sont plus engagés dans les activités statiques et les Ar sont plus impliqués dans des courses d'intensité supramaximale. Aucune différence significative entre les groupes n'est mise en évidence pour les courses de MI. Tous les groupes de postes présentent des pourcentages similaires de T:R lorsqu'ils sont répartis par durée de travail.

Les T3L effectuent significativement plus de T:R > 1 que les T2L ou les AlAr, ces derniers sont ceux qui en effectuent le moins. Les AlAr effectuent significativement plus de T:R < 1:4 que les autres groupes. Pour des durées de travail inférieures à 4 s et quelle que soit la catégorie d'intensité, la majeure partie des actions correspond à un T:R < 1:4. Pour des durées de travail > 4 s et des activités de type statique, les Av présentent une prépondérance de T:R < 1. Pour des courses dont l'intensité est supérieure à VMA, les Ar présentent un pourcentage important de durée de travail > 4 s, indépendamment du ratio.

3.4 Les accélérations

La durée moyenne des accélérations est significativement plus élevée pour les Ar comparés aux Av ($0,85 \pm 0,06$ et $0,76 \pm 0,03$ s respectivement ; $P < 0,05$). La durée maximale d'accélération est significativement plus élevée pour les Ar comparée aux Av ($3,67 \pm 0,35$ et $3,24 \pm 0,39$ s respectivement ; $P < 0,05$).

La valeur d'accélération moyenne est significativement plus élevée pour les Av que pour les Ar ($2,46 \pm 0,92$ et $2,36 \pm 0,93$ m.s⁻², respectivement ; $P < 0,05$). Les valeurs les plus élevées d'accélération moyenne sont observées pour les T3L ($2,50 \pm 0,95$ vs $2,41 \pm 0,89$, $2,38 \pm 0,90$ et $2,34 \pm 0,98$ m.s⁻² pour les P2L, Centres et AlAr respectivement; $P < 0,001$). Les Centres et les AlAr démontrent des valeurs moyennes d'accélération significativement plus faibles que les P2L ($P < 0,05$). Les AlAr démontrent des valeurs moyennes d'accélération significativement plus faible que les Centres ($P < 0,05$).

Tableau 9 : Distribution des ratios (T:R ; en % du nombre total de ratios) classés, pour chaque groupe et sous-groupe et chaque catégorie d'intensité, en fonction de la durée du travail

Durée Travail	< 2 s			2 - 4 s			> 4 s			
	Ratio T:R	T:R < 1:4	1:4 < T:R < 1	T:R > 1	T:R < 1:4	1:4 < T:R < 1	T:R > 1	T:R < 1:4	1:4 < T:R < 1	T:R > 1
Activité Statique	P2L	6,2±3,2	1,5±1,1	0,1±0,3	8,7±2,7	3,0±1,4	1,0±1,1	5,5±1,5	4,0±1,8	3,3±2,0
	T3L	5,9±2,9	1,5±1,2	0,4±0,5	7,6±3,0	2,8±1,3	1,4±1,0	5,0±2,1	2,9±1,7	4,5±3,1
	Avants	6,0±3,0	1,5±1,2	0,3±0,4	8,2±2,9	2,9±1,3	1,2±1,1	5,2±1,8	3,4±1,8	3,9±2,7
	Centres	3,4±1,6 ab	0,7±0,6 a	0,3±0,5	2,3±1,7 ab	1,3±1,0 ab	0,4±0,6 b	0,2±0,5 ab	0,4±0,4 ab	0,1±0,3 ab
	AlAr	3,4±2,4 ab	0,5±0,5 ab	0,3±0,5	1,9±1,1 ab	0,2±0,5 abc	0,5±0,6 b	0,7±0,7 ab	0,2±0,5 ab	0,1±0,2 ab
	Arrières	3,4±2,0 *	0,6±0,6 *	0,3±0,5	2,1±1,4 *	0,8±0,9 *	0,4±0,6 *	0,4±0,6 *	0,3±0,5 *	0,1±0,3 *
	> VMA	P2L	3,9±2,3	1,7±1,4	1,3±1,2	3,0±2,2 cd	1,7±1,0 cd	1,9±1,3 c	4,0±2,6 cd	4,6±1,6 cd
T3L	2,6±2,5 acd	1,1±0,9 c	0,7±0,9	2,6±1,4 cd	1,4±1,0 cd	2,2±1,2 c	4,1±2,8 cd	4,0±2,0 cd	5,4±2,6 cd	
Avants	3,2±2,4 *	1,4±1,2 *	1,0±1,1	2,8±1,8 *	1,6±1,0 *	2,1±1,2 *	4,1±2,7 *	4,3±1,8 *	5,3±2,4 *	
Centres	4,8±1,9	2,3±1,2	0,7±0,7	6,4±2,6 d	3,3±1,6	3,6±1,1	9,7±3,2 d	8,2±3,2	10,2±4,7	
AlAr	5,7±2,8	2,5±2,1	1,4±2,3	10,7±5,1	4,3±2,6	2,9±1,4	12,6±3,8	7,4±3,2	8,0±2,7	
Arrières	5,2±2,4	2,4±1,7	1,0±1,7	8,5±4,5	3,8±2,2	3,3±1,3	11,1±3,8	7,8±3,2	9,1±4,0	
MI	P2L	8,8±3,7 c	3,8±2,2	1,7±1,1	7,3±3,7	3,7±2,0	2,5±1,5	4,1±1,8	4,0±2,4	3,6±2,3
	T3L	10,4±3,7	4,5±2,5	1,7±1,5	6,3±1,7 cd	4,3±1,8	3,3±2,2	4,6±2,7	4,3±2,1	4,6±2,8
	Avants	9,6±3,8	4,1±2,3	1,7±1,3	6,8±2,9 *	4,0±1,9	2,9±1,9	4,4±2,3	4,1±2,2	4,1±2,6
	Centres	10,9±2,2	3,6±2,5	1,3±1,1	8,3±2,1	4,1±2,1	2,5±1,6	3,1±1,3 b	4,9±2,1	3,2±2,7
	AlAr	10,7±3,6	2,7±1,9 b	0,7±1,0 ab	9,5±3,4	3,4±2,3	1,6±2,1 b	3,9±3,1	2,7±2,3 bc	1,7±1,9 ab
	Arrières	10,8±2,9	3,2±2,3	1,0±1,1 *	8,8±2,8	3,8±2,2	2,1±1,8	3,5±2,3	3,9±2,4	2,5±2,4 *

a significativement différent des P2L, P<0,05 ; b significativement différent des T3L, P<0,05 ; c significativement différent des Centres, P<0,05 ; d significativement différent des AlAr, P<0,05 ; * différence significative entre les groupes (Avants et Arrières), P<0,05. Cellules grises, Pourcentage de T:R supérieur à 5%. VMA : Vitesse maximale aérobie ; MI : Course à moyenne intensité.

Tableau 10 : Pourcentage de ratios classés en fonction de l'intensité de la phase de travail, de la durée de la phase de travail ou de la catégorie de ratio (T:R) pour chaque groupe et sous-groupe

	Intensité de la phase de Travail			Durée de la phase de Travail			Ratio T:R		
	MI	> VMA	Activité statique	0-2 s	2-4 s	> 4 s	W:R < 1:4	1:4 < W:R < 1	W:R > 1
P2L (20)	39,5±12,2	27,2±9,2 cd	33,3±5,6	29,0±4,0	32,8±4,4	38,2±4,2	51,4±6,2 d	27,9±4,8	20,6±4,4 b
T3L (20)	44,0±14,4	24,1±9,0 cd	31,8±7,8	28,7±4,8	32,0±2,8	39,3±4,4	49,1±5,4 d	26,7±5,6	24,2±4,4
Avants (40)	41,8±13,4	25,7±9,2 *	32,6±6,8	28,8±4,4	32,4±3,7	38,8±4,3	50,3±5,9	27,3±5,1	22,4±4,7
Centres (14)	41,9±7,2	49,0±7,8	9,1±3,1 ab	27,9±4,1	32,1±4,1	40,0±6,4	48,9±5,0 d	28,8±4,0	22,3±6,3
AlAr (13)	37,0±12,2	55,4±13,0	7,6±3,4 ab	27,8±4,6	35,0±6,0	37,2±4,9	59,0±6,6	23,9±7,2	17,1±4,3 abc
Arrières (27)	39,6±10,1	52,1±10,9	8,4±3,2 *	27,8±4,3	33,5±5,2	38,7±5,8	53,8±7,7	26,4±6,1	19,8±5,9

.a significativement différent des P2L, $P < 0,05$; b significativement différent des T3L, $P < 0,05$; c significativement différent des Centres, $P < 0,05$; d significativement différent des AlAr, $P < 0,05$; * différence significative entre les groupes (Avants et Arrières), $P < 0,05$. VMA : Vitesse maximale aérobie ; MI : Course à moyenne intensité. (Nombre de fichiers analysés).

Tableau 11 : Evolution du pourcentage de ratios T:R en fonction de l'intensité de la phase de travail, de la durée de la phase de travail ou de la catégorie de ratio T:R entre les mi-temps (MT1 et MT2)

		Intensité de la phase de Travail			Durée de la phase de Travail			Ratio T:R		
		MI	> VMA	Activité statique	0-2 s	2-4 s	> 4 s	W:R < 1:4	1:4 < W:R < 1	W:R > 1
Avants (19)	MT1	36,1±11,6	28,0±8,3	35,9±6,3	28,8±6,1	32,6±4,3	38,6±5,2	51,1±7,6	26,4±5,8	22,4±5,0
	MT2	36,7±10,2	27,6±10,2	35,8±3,5	29,1±4,8	31,8±3,4	39,1±6,0	51,3±5,8	24,6±4,5	24,0±6,3
Arrières (18)	MT1	42,0±10,3	49,4±10,7	8,6±3,4	27,0±4,8	36,0±5,1	37,0±6,2	51,7±8,1	28,5±6,4	19,8±6,6
	MT2	43,1±11,4	48,3±11,3	8,5±5,0	28,7±6,9	34,8±7,0	36,5±8,0	54,4±7,9	23,8±6,0 *	21,9±5,9

* significativement différent de MT1, $P < 0,05$. VMA : Vitesse maximale aérobie ; MI : Course à moyenne intensité. (Nombre de fichiers analysés).

Une analyse globale des résultats présentés sur la figure 3, démontre qu'une grande partie des accélérations ($41,2 \pm 7,6$ %) est comprise entre 1 et 2 m.s^{-2} . Les pourcentages des catégories « entre 2 et 3 m.s^{-2} » et « supérieures à 3 m.s^{-2} » représentent $37,7 \pm 3,9$ et $21,1 \pm 6$ % du nombre total d'accélérations respectivement. La majorité des accélérations ont été identifiées dans les catégories « jogging » ($31,8 \pm 5$ %) ou « arrêt-marche » ($53,4 \pm 5,5$ %). Le pourcentage total d'accélérations dans les catégories « arrêt-marche » et « jogging » est supérieur chez les P2L et les AlAr si on les compare aux Centres ($86,5 \pm 3,0$ % et $85,7 \pm 4,7$ % vs $82,7 \pm 3,1$ %, respectivement ; $P < 0,05$) mais aucune différence significative n'apparaît lorsque Av et Ar sont comparés. La figure 3 montre que les T3L ont un pourcentage d'accélérations comprises entre 1 et 2 m.s^{-2} inférieur aux autres groupes. Cependant, les T3L ont un pourcentage d'accélérations « $> 3 \text{ m.s}^{-2}$ » plus élevé que les Centres et les AlAr dans les catégories d'intensité comprise entre « arrêt-marche » et « MI ». Les P2L démontrent le pourcentage moyen d'accélération le plus faible dans la catégorie « $> \text{VMA}$ ».

3.5 Comparaison des Mi-Temps 1 et Mi-Temps 2.

Le tableau 11 présente l'évolution de la distribution des ratios entre les MT1 et les MT2. Quel que soit le groupe, aucune différence n'est mise en évidence entre les deux mi-temps que l'on considère les pourcentages dans les différentes catégories d'intensité, la durée des phases de travail ou la distribution des ratios. Une exception néanmoins : les Ar démontrent un pourcentage de ratio compris entre 1 et 1:4 significativement diminué en deuxième mi-temps. Les deux autres catégories de ratio n'ont pas été modifiées significativement car la diminution dans la catégorie $1:4 < \text{T:R} < 1$ est faible et que les ratios ont été également distribués dans ces deux autres catégories.

Globalement, l'accélération moyenne est significativement supérieure lors de la MT1 comparée à la MT2 ($2,45 \pm 0,95$ vs $2,38 \pm 0,90 \text{ m.s}^{-2}$, respectivement ; $P < 0,001$). Cette diminution du niveau d'accélération est observée pour les Av ($2,49 \pm 0,93$ vs $2,42 \pm 0,91$ pour MT1 et MT2 respectivement $P < 0,05$) et les Ar ($2,39 \pm 0,97$ vs $2,33 \pm 0,89 \text{ m.s}^{-2}$ pour MT1 et MT2 respectivement ; $P < 0,05$). L'analyse par sous-groupe montre que l'accélération moyenne ne diminue significativement que pour les T3L ($2,55 \pm 0,96$ vs $2,45 \pm 0,94$ pour MT1 et MT2 respectivement, $P < 0,001$). Une tendance est observée pour les autres sous-groupes.

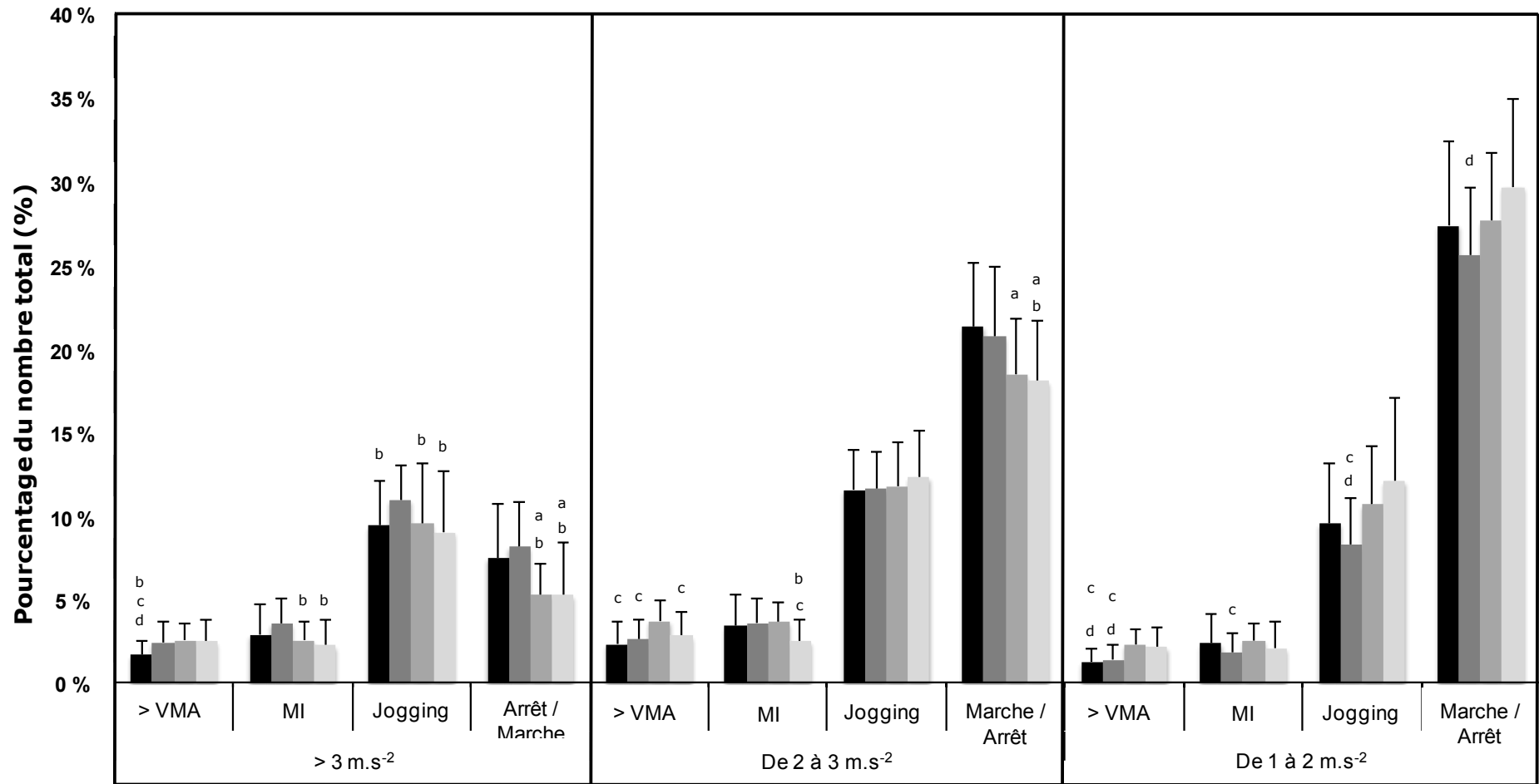


Figure 4 : Distribution des accélérations (% du nombre total d'accélérations) en fonction de la catégorie d'intensité.

a significativement différent des P2L, $P < 0,05$; b significativement différent des T3L, $P < 0,05$; c significativement différent des Centres, $P < 0,05$; d significativement différent des AIAr, $P < 0,05$; VMA : Vitesse maximale aérobie ; MI : Course à moyenne intensité.

4. Discussion.

Le but de cette étude était de proposer une approche originale de l'analyse de l'activité afin de compléter les connaissances sur la dépense énergétique lors de compétitions internationales de rugby à XV.

L'originalité de cette étude est qu'elle propose de définir des catégories d'intensité basées sur des vitesses individualisées. Récemment, Cahill et coll. (2012), ont proposé une analyse individualisée de matchs du championnat élite anglais, basée sur des seuils établis en fonction de la vitesse maximale des joueurs. Nous avons fait le choix de VMA comme seuil d'intensité supramaximale. En effet, il est généralement admis que la fatigue apparaît rapidement lors d'exercices d'intensité supérieure à VMA. Ce choix apparaît particulièrement justifié lorsque l'objectif est d'estimer la sollicitation énergétique. Nous observons que VMA a tendance à être inférieure chez les P2L. Cette tendance est confirmée par les résultats de Quarrie et coll. (1996) ainsi que ceux de Higham et coll. (2013) qui démontre une différence significative d'aptitude aérobie (appréciée indirectement par des test de terrain en navette) entre les postes, les piliers et 2^{ème} lignes démontrant les valeurs d'aptitude aérobie les plus faibles. Cette différence d'aptitude aérobie confirme l'intérêt d'individualiser les vitesses pour définir le travail à haute intensité. L'utilisation d'une vitesse identique pour tous les joueurs entraînerait une sous-estimation systématique du travail intense réalisé par les joueurs démontrant les VMA les plus faibles (Abt et Lovell 2009). Le fait que nous soyons les premiers à proposer une individualisation du choix des vitesses dans le cadre de l'analyse de l'activité en rugby met en évidence le fait que l'évaluation physiologique n'est pas systématique au niveau international et/ou que ces données ne sont pas accessibles pour les scientifiques. Cette absence de mesures et/ou de communication des résultats rend difficile la comparaison des caractéristiques physiologiques (VMA et/ou VLa4) des joueurs de cette étude avec d'autres joueurs de même niveau et de nations différentes.

La méthode utilisée pour quantifier les activités statiques est également plus représentative de la sollicitation énergétique des joueurs. La participation dans les activités statiques n'a été prise en compte que lorsque l'épaule du joueur était en contact avec un joueur du regroupement. Dans les études précédentes un joueur était considéré comme actif dans un

regroupement s'il était lié au regroupement ce qui n'impliquait pas forcément une participation active. En conséquence, la durée moyenne des activités statiques dans cette étude (4,15 et 2,21 s pour les Av et Ar respectivement) est inférieure à celles présentées dans d'autres études (de 5 à 7,1 s et de 3,6 à 4,2 s pour les Av et Ar respectivement; Deutsch et coll. 2007; Duthie et coll. 2005; Roberts et coll. 2008). Par contre, cette durée moyenne est en accord avec celle présentée par Quarrie et coll. (2012), comprise entre 3,1 et 3,6 s en fonction des postes lors de compétition dans l'hémisphère sud. Cette différence, moins marquée entre les postes dans l'étude de Quarrie et coll. (2012), pourrait être le témoin de la différence entre le rugby de l'hémisphère sud et le rugby européen. Le nombre moyen d'activités statiques pour les Av (en moyenne 53 dont 22 mêlées) est plus faible que celui présenté dans d'autres études (Deutsch et coll. 2007; Duthie et coll. 2005; Roberts et coll. 2008) et concernant le championnat anglais élite (en moyenne 91 dont 21 mêlées) et comparable au nombre d'environ 57 (dont 25 mêlées) calculé d'après les données de Quarrie et coll. (2012). Il n'est pas possible de déterminer si la différence du nombre d'activités statiques, hors mêlées, par rapport à l'étude de Roberts et coll. (2008) est due à la méthodologie utilisée et/ou au niveau de jeu et/ou au style de jeu des équipes étudiées.

En accord avec l'étude d'Austin et coll. (2011a), le temps total de travail est similaire entre les P2L (11,9 min), les T3L (11,2 min) et les Centres (10,4 min) mais significativement plus faible pour les AIAr (7,1 min). Cette différence est essentiellement liée au fait que le nombre total de ratio est plus faible chez les AIAr (entre 24 et 36 % en fonction des postes). Le tableau 10 montre que les Av sont plus sollicités dans les phases statiques que les Ar, ces derniers étant plus impliqués dans les courses d'intensité supramaximale. Les Av parcourent une distance totale moins importante que les Ar (7006 m et 7944 m respectivement). Les P2L parcourent la plus faible distance lors d'un match (6935 m) : ces résultats sont en accord avec ceux d'Austin et coll. (2011a) et de Roberts et coll. (2008). En accord avec Austin et coll. (2011a), les T3L et les AIAr parcourent des distances similaires et les Centres tendent à parcourir la plus grande distance totale. La distance totale parcourue, inférieure pour les P2L, semble en accord avec la tendance observée pour VMA, plus faible dans ce groupe. De plus amples études sont nécessaires afin d'étudier si la VMA peut représenter un facteur limitant pour les déplacements en rugby.

Le niveau de compétition des sujets et/ou l'approche méthodologique de notre travail présente des différences avec les études précédentes rendant ainsi les comparaisons parfois difficiles notamment la valeur absolue des paramètres est considérée. Cependant, une analyse comparée démontre que les matchs de rugby joués par l'équipe de France présentent globalement les mêmes caractéristiques et les mêmes différences entre les postes que le rugby élite de l'hémisphère sud et que le rugby élite Anglais.

La distance totale parcourue est souvent considérée comme le témoin de la sollicitation énergétique globale. Cependant, cette distance parcourue ne donne aucune information concernant l'intensité des déplacements qui va déterminer la dépense énergétique. De plus, la durée dans les différentes catégories d'intensités ou l'analyse des vitesses moyennes ne donne que des informations partielles et l'analyse de l'accélération doit être prise en compte dans le cadre du travail intermittent afin d'estimer au mieux la sollicitation énergétique.

La Figure 3 montre que la majorité des accélérations sont inférieures à 3 m.s^{-2} . En accord avec ces résultats, Cunniffe et coll. (2009) rapportent que la majorité des accélérations atteintes en 1 s sont comprises entre 1,5 et $2,5 \text{ m.s}^{-2}$. Ces résultats démontrent aussi que la durée moyenne des phases d'accélérations dépassant 1 m.s^{-2} est inférieure à 1 s, avec une durée maximale moyenne comprise entre 3 et 4 s. La valeur moyenne d'accélération moyenne est supérieure de 4,2 % quand on compare les Av et les Ar. Les T3L présentent les accélérations moyennes les plus élevées sur tout le match. En accord, avec les résultats de Cahill et coll. (2012), nos résultats soulignent également que le travail à des intensités élevées est supérieur pour les T3L en comparaison des P2L, des Centres ou des AIAr. Cette observation est en accord avec les exigences de jeu du poste de T3L et justifie la tendance observée pour ce groupe de posséder une VMA plus importante que les trois autres groupes.

Selon Osgnach et coll. (2010), la puissance métabolique est influencée d'une part, par la vitesse de course initiale et d'autre part, par l'accélération : pour une accélération donnée, la puissance métabolique sera plus importante si la vitesse initiale est élevée. Comme on peut le voir sur la figure 3, la plupart des accélérations débutent à des intensités faibles correspondant à des périodes de récupération. Il est intéressant de noter que les Av, et particulièrement les T3L, sont plus impliqués dans les accélérations supérieures à 3 m.s^{-2} .

Les centres réalisent plus d'accélération dans des courses correspondant à des catégories « MI » ou « >VMA ». Pour les Av, la majeure partie des accélérations se situe dans la catégorie « debout ou en marche ». Cela suppose qu'ils sont contraints à produire des niveaux d'accélération plus importants s'ils souhaitent atteindre la même vitesse de course que les Ar qui réalisent des accélérations à partir des catégories « MI » ou « >VMA ». Les accélérations moyennes plus élevées pour les T3L corroborent cette hypothèse.

L'activité intermittente peut être caractérisée par l'analyse de la distribution des ratios T:R en fonction de la durée de travail et de la catégorie d'intensité de cette même période de travail. Le ratio moyen (calculé en divisant la durée moyenne de travail par la durée moyenne de récupération) était de 1:6,5 et 1:8,5 chez les Av et Ar respectivement. Ces résultats sont comparables aux valeurs de 1:4 à 1:6 obtenues dans les études précédentes concernant le rugby moderne (Austin et coll. 2011a; Eaton et George 2006). Une analyse globale des résultats présentés dans le tableau 9 démontre que : i) environ 65 % des périodes de travail durent moins de 4 s ; ii) la moitié des T:R sont inférieurs à 1:4 et environ un tiers est compris entre 1:4 et 1 ; et iii) environ 40 % des périodes de travail correspondent à une intensité moyenne (comprise entre VLa4 et VMA). Si l'on considère la distribution des ratios et le fait que des efforts statiques de courte durée et de haute intensité (voire d'intensité maximale) ou de sprints sont répartis à intervalles réguliers et que ces efforts intenses sont entrecoupés de période de travail et de récupération d'intensité et de durées variables, il n'apparaît pas de façon évidente que l'activité conduise à une fatigue systématique. En accord avec notre hypothèse et avec les résultats des études précédentes (Cunniffe et coll. 2009; Roberts et coll. 2008) l'analyse de l'évolution de l'activité individuelle par mi - temps ne démontre aucune diminution du temps passé dans les activités intenses, ni dans la durée de ces phases et aucune modification de la distribution des ratios. Néanmoins, les résultats démontrent une diminution faible mais significative de l'ordre de 2,9 % de l'accélération moyenne au cours de la MT2. Cette diminution peut être attribuée à un phénomène de fatigue et/ou à une diminution stratégique de l'activité en rapport avec le score (Lago et coll. 2010). Cette dernière hypothèse est probable dans la mesure où 4 matchs sur 5 ont été remportés par les joueurs. L'accélération moyenne diminue chez les Av et les Ar (de 2,8 % et 2,5 % respectivement) au cours de la MT2, mais cette diminution n'est significative que pour les T3L. Cette diminution pourrait être justifiée par le

pourcentage supérieur de T:R supérieur à 1 et d'accélération supérieures à 3 m.s^{-2} observés dans le groupe des T3L. Des études complémentaires seront nécessaires pour mettre en relation cette diminution du niveau moyen d'accélération et les valeurs de $V_{Ia4\%}$ (paramètre généralement associé avec les qualités d'endurance) significativement inférieures chez les T3L en comparaison des 3 autres groupes. Ces résultats soulignent l'intérêt de prendre en compte l'accélération dans les activités intermittentes. Cependant, la précision et la fiabilité de l'accélération calculée à partir d'une double dérivée des valeurs de déplacement échantillonnées à 10 Hz ainsi que le nombre réduit de sujets dans chaque sous-groupe appelle à la prudence quant à la généralisation de ces résultats. De futures études utilisant les nouvelles technologies (GPS et accéléromètre) sont nécessaires afin de confirmer ces résultats.

Cette étude présente une autre limite : elle ne permet pas de mettre en évidence une fatigue temporaire liée à une grosse séquence de jeu. Austin et coll. (2011b) ont analysé la répétition de phases de jeu très intenses impliquant au moins 3 sprints et/ou phase statique et/ou plaquage entrecoupés de périodes de récupération inférieures à 21 s pendant la même phase de jeu. Les résultats de cette étude démontrent que ces phases de jeu interviennent 7 à 8 fois par mi-temps pour les avants et les Centres et moins de 4 fois pour les AIAr. La durée moyenne de ces phases de jeu intense est inférieure à 50 s pour les Av et inférieure à 30 s pour les Ar. La durée maximale de ces phases intenses était plus importante pour les P2L (118 s) et les T3L (165 s) que pour les Centres (64 s) et les ArAI (53 s). Ces résultats confirment le niveau de sollicitation important des T3L et confirme qu'une fatigue temporaire peut apparaître mais elle ne peut pas être mise en évidence par l'analyse statistique si elle ne concerne que 2 ou 3 joueurs sur un groupe de 8. De plus dans notre analyse, les données ont été moyennées sur 5 matchs ce qui tend à pondérer l'influence de ces phases sur l'activité globale. L'analyse chronologique des ratios devrait permettre d'identifier ces phases de fatigue temporaire qui pourrait être déterminantes pour l'issue du match. De même comme l'ont suggéré Roberts et coll.(2008), on ne peut pas exclure que la fatigue se traduise par une diminution du niveau de force produit dans les regroupements et notamment les mêlées ce qui est difficile voire impossible à quantifier objectivement.

5. Conclusion.

A notre connaissance, cette étude est la première à proposer une analyse de l'activité du rugby à XV à l'aide d'un système de suivi vidéo semi-automatique, au cours de cinq rencontres internationales. Malgré certaines limites méthodologiques, l'analyse des résultats démontrent l'intérêt d'analyser l'accélération et les ratios T:R afin d'estimer le niveau de sollicitation métabolique. En accord avec les études précédentes, ces résultats démontrent que les matches de rugby internationaux placent des sollicitations physiques spécifiques sur les joueurs occupant les différents groupes de poste. Cette approche nous a permis de montrer que les T3L semblent être les joueurs les plus sollicités d'un point de vue énergétique. Ces joueurs démontrent les niveaux d'accélérations les plus élevés mais ils diminuent ce niveau d'accélération lors de la MT2. Ces résultats tendent à démontrer que la combinaison des phases de travail et de récupération est optimale afin de prévenir une diminution importante de l'intensité du jeu. Des applications pratiques pourraient découler de cette étude :

- L'individualisation qualitative des programmes d'entraînement entre les différents groupes de poste : par exemple, les Av et notamment les T3L devraient améliorer leur capacité à accélérer et à répéter les accélérations.
- La distribution des ratios présentée dans cette étude pourrait être prise en compte pour concevoir des exercices intermittents spécifiques.

ÉTUDE 2

Fatigue et répétition d'efforts maximaux isométrique.

Cette étude a fait l'objet d'une communication sous forme de poster lors du congrès international du Collège Européen des Sciences du Sport (ECSS) Bruges, juillet 2012 (Annexe 2).

Neuromuscular fatigue during repeated maximal static exertion in international rugby union player (PP-PM63 Neuromuscular physiology 4; p541)

Mathieu Lacome, Julien Piscione, Muriel Bourdin.

1. Objectifs de l'étude.

L'objectif de cette étude est d'analyser l'exercice statique maximal intermittent lors d'une série d'exercices simulant les poussées observées lors des mêlées et des regroupements en rugby. L'objectif secondaire est de tester l'hypothèse que le maintien de la performance est associé à la capacité oxydative estimée par la mesure de VL_a%.

2. Matériel et méthodes

2.1 Caractéristiques des joueurs.

Dix-sept (17) rugbymen internationaux du Pôle France rugby de Marcoussis (moins de 19 ans, U19) ont été sélectionnés pour participer à cette étude. Ce groupe est constitué de 13 joueurs avants (4 piliers, 2 talonneurs, 2 joueurs de deuxième ligne et 5 joueurs de troisième ligne) et de 4 centres. Ces joueurs ont été sélectionnés car leur poste implique des efforts statiques répétés dans les regroupements et plus spécifiquement dans les mêlées pour les avants. Les caractéristiques anthropométrique et physiologique des sujets sont présentées dans le tableau 11.

Tableau 11 : Caractéristiques anthropométrique et physiologique des sujets (n = 17).

Age (années)	18,3 ± 0,4
Taille (m)	1,87 ± 0,06
Poids (kg)	101,4 ± 10,5
$\dot{V}O_2$ max (l.min ⁻¹)	4,9 ± 0,5
$\dot{V}O_2$ max (ml.min ⁻¹ .kg ⁻¹)	48,7 ± 5,3
VMA (km.h ⁻¹)	15,0 ± 1,5
VL _a 4 (% VMA)	76,1 ± 7,1

2.2 Protocole

Les 5 sessions du protocole ont été intégrées dans le programme d'entraînement hebdo-

madaire des joueurs. Chaque session était séparée par au moins 2 jours et le volume d'entraînement était systématiquement limité les 24h précédant la session.

1^{ère} session (30 min) :

Lors de la première session, la distance entre la position des pieds et le simulateur de mêlée a été déterminée de façon à standardiser la position contre le simulateur de mêlée instrumenté, dos droit et horizontal et angle du genou de 120°. Une butée mécanique a été fixée au sol pour éviter le glissement des pieds lors de la poussée. La mesure de l'angle du genou a été vérifiée à l'aide d'un rapporteur.

2^{ème} et 3^{ème} session (30 min) :

Deux sessions de familiarisation de poussée contre le simulateur de mêlée ont été réalisées pour chaque joueur. Une fois le joueur repositionné à partir des mesures réalisées lors de la 1^{ère} session, le sujet devait réaliser 3 à 5 poussées maximales contre le simulateur afin de lui permettre de se familiariser avec le protocole, le matériel et la position.

4^{ème} session (45 min) :

L'évaluation physiologique des joueurs fait partie intégrante du suivi annuel des joueurs.

La taille et le poids des sujets ont été mesurés. Les sujets devaient ensuite réaliser un test incrémental sur tapis roulant dans le but de déterminer $\dot{V}O_{2max}$, VMA et VL₄. Les durées de course et de récupération étaient de 4 et 0,5 min respectivement. Suite à un échauffement de 5 min, la vitesse de course était augmentée de 1,5 km.h⁻¹. L'air expiré a été prélevé et analysé lors des 30 dernières secondes de chaque palier. Afin de déterminer [La]_s, vingt microlitres de sang était prélevés au bout de l'index droit lors de chaque période de récupération et 3 minutes après la fin du test.

$\dot{V}O_2$ mesuré lors du dernier palier a été considérée comme maximal lorsqu'un plateau était obtenu (variation de $\dot{V}O_2$ de moins de 2 ml.kg⁻¹.min⁻¹). En l'absence d'un plateau, la valeur de $\dot{V}O_2$ obtenue sur la dernière période de course était considérée comme maximale si au moins 2 des 3 critères suivant étaient réunis : Fc égale ou supérieure à Fc max prédite à partir de l'âge, calculée à l'aide de la formule proposée par Inbar et coll. (1994) : 206 – 0,68 x âge ; [La]_s mesurée après la fin du dernier palier supérieure à 9 mmol.l⁻¹ et un

quotient respiratoire (QR) supérieur à 1,05.

5^{ème} session (120 min) :

La dernière session a été consacrée au test de répétition d'efforts maximaux isométrique. Cette session a été réalisée en accord avec les entraîneurs responsables de la Fédération Française de Rugby et intégrée dans le contrôle d'entraînement.

Un schéma de la procédure expérimentale est présenté en figure 4. Pour commencer, les joueurs réalisaient un échauffement standardisé de 10 min (5 min de vélo sur bicyclette ergométrique (M3 indoor cycle, Keyser, CA, USA ; fréquence : 80-90 RPM ; intensité : 2 Watts.kg⁻¹), 6 fentes avant par jambe et 4 flexions en squat sur chaque jambe sans charge). A l'issue de l'échauffement, les différents sites de la cuisse sur lesquels devaient être posés des électrodes ont été rasés, nettoyés et abrasés. Les électrodes EMG ont été positionnées sur le *Rectus femoris* (RF), le *Vastus lateralis* (VL), le *Vastus medialis* (VM) et le *Biceps femoris* (BF) selon les recommandations de la SENIAM (Surface ElectroMyography for the Non-Invasive Assessment of Muscles). L'épaisseur du pli cutané sur le site d'application de la sonde NIRS a été préalablement déterminée ($11,8 \pm 3,0$ mm) à l'aide d'une pince de Harpenden (British Indicators Ltd, UK). La sonde du NIRS a été positionnée sur le VL de la jambe droite, à environ 12-14 cm de l'articulation du genou, le long de l'axe vertical de la cuisse à proximité de l'électrode EMG. La sonde du NIRS était recouverte avec une bande adhésive afin de prévenir la contamination de la mesure par la lumière ambiante. Trois électrodes ont également été collées sur le torse des joueurs pour mesurer la Fc battement par battement.

Pour tester le bon fonctionnement de l'ensemble du matériel et s'assurer que le matériel ne gênait pas le mouvement, 1 poussée maximale isométrique de 5 s contre le simulateur suivi de 10 min de récupération passive a été réalisée.

Un prélèvement de sang a été effectué pour le dosage du lactate sanguin avant le début de la répétition des poussées. Le joueur était ensuite équipé avec le pince-nez et l'embout buccal, nécessaires pour le recueil des gaz expirés, avant d'effectuer 12 poussées maximales de 5 s contre le simulateur, espacées de 15 s de récupération passive (durée totale : 4 min). La consigne donnée par les expérimentateurs était de réaliser chaque poussée de façon maximale. A chaque poussée les expérimentateurs encourageaient vivement les joueurs. Pendant la phase de récupération le joueur se relevait pendant environ 10 s, puis

se mettait en position les 5 s de récupération restante de façon à être prêt pour la poussée suivante. La poussée débutait au top donné par une bande sonore spécialement conçu pour l'expérimentation avec un logiciel de création de fichier sonore. A l'issue de cette série de poussées, une période de 10 min de récupération passive (4 premières minutes effectuées debout et les 6 dernières assise) a été imposée pour effectuer des prélèvements de lactate à intervalles régulier afin de déterminer la concentration en lactate sanguin pic ($[La]_{spic}$) (toutes les 30 s pendant 5 min puis toutes les minutes jusqu'à 10 min).

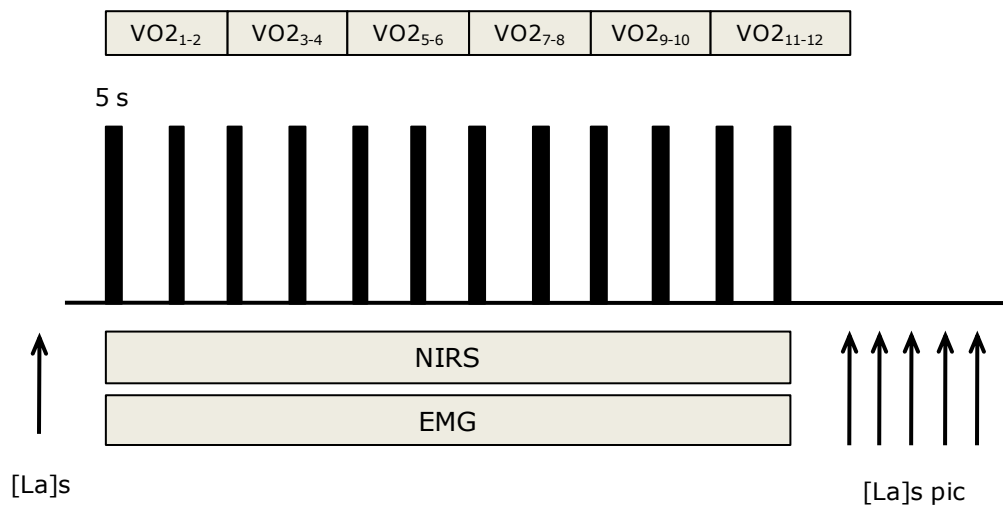


Figure 5 : Schéma du protocole expérimental de l'étude 2.

$[La]_s$: Concentration de lactate dans le sang ; $[La]_s\ pic$: Concentration de lactate pic dans le muscle, suite à l'exercice. $\dot{V}O_{2\ 1-2}$: Consommation d'oxygène moyenne sur les répétitions 1 et 2.

2.3 Systèmes de mesure

Mesures de $\dot{V}O_2$

Session 4 : Evaluation physiologique

La Fc a été enregistrée en continue à l'aide d'un cardiofréquence-mètre (Polar Team 1, Kempele, Finland).

Les gaz expirés ont été collectés via une valve faible résistance Hans Rudolph 2700 (Kansas city, MO, USA) connectée à une chambre de mélange, et recueillis dans un spiromètre de Tissot (Gymrol, Saint Etienne, France). Les fractions d' O_2 et de CO_2 ont été déterminées grâce à un analyseur de précision (Servopro 4100, Servomex limited, Crowborough East Sussex, UK) calibré chaque demi-journée avec des mélanges de gaz de composition

connue.

Session 5 : répétition d'efforts maximaux isométrique

Les gaz expirés ont été recueillis dans des sacs de Douglas toutes les 40 s (2 répétitions incluant la période de récupération, figure 4). Les sacs de Douglas étaient connectés à une valve 3 voies qui permettait une acquisition continue de l'air expiré. La méthode des sacs de Douglas est la méthode de référence afin de déterminer la $\dot{V}O_2$ et la $\dot{V}CO_2$ (Davis 1995) et démontre une précision de l'ordre de 3 % (James et coll. 2006).

Détermination de $[La]_s$

$[La]_s$ a été mesurée avec le YSI2300 Lactate analyser (YSI inc. Yellow Springs, OH, USA).

Simulateur de mêlée.

Le simulateur de mêlée a été conçu dans le cadre d'une collaboration entre la FFR et Thales Training and Simulation (Cergy, France). Le simulateur de mêlée permet de déplacer une tête de joug sur 6 degrés de liberté (3 mouvements de translation suivant les axes x, y et z ainsi que les 3 mouvements de rotation selon les mêmes axes ; figure 5). La position du simulateur dans l'espace est déterminée par les élongations de six vérins hydrauliques. Le simulateur est équipé de 3 capteurs de force MC5-10000 (AMTI inc, Watertown, MA, USA ; valeur maximale 44 500 N en z et 22 250 N en x et y), placés dans la liaison entre la tête du joug et le plateau mobile. Le simulateur est commandé par un logiciel qui permet d'envoyer des consignes au simulateur (*i.e.*, déplacements des têtes de joug, force générée) et d'enregistrer les données issues des capteurs de force. Dans le cadre de notre étude, le simulateur était bloqué en position standard, la tête de joug positionnée à 70cm du sol, afin de permettre l'exécution de poussées statiques. L'enregistrement des données de force issues du simulateur été enregistrées via le logiciel propriétaire du simulateur.

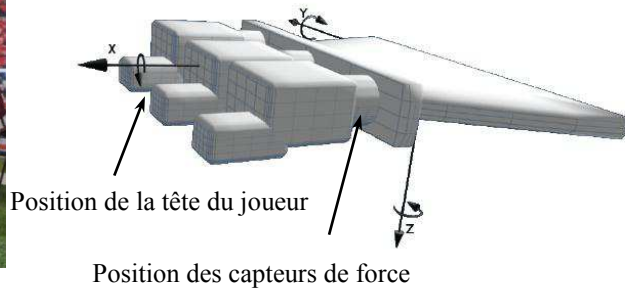


Figure 6 : Photo du simulateur de mêlée et schéma technique des têtes de joug.

Activité EMG.

L'activité EMG et Fc ont été enregistrés à l'aide du système Biopac (Biopac MP150, Biopac Systems Inc., Santa Barbara, CA, USA) grâce à des électrodes de surface (Blue Sensor, Ambu, Le Haillan, France). La distance inter électrode était fixée à 20 mm (de centre à centre). L'électrode de référence était fixée sur la malléole latérale de la cheville droite. Le signal EMG a été amplifié avec une bande passante de fréquence allant de 1 à 500 Hz (taux de rejet en mode commun : 90 dB ; impédance d'entrée : 100 M Ω ; gain : 1000) et enregistré à une fréquence d'échantillonnage de 2000 Hz.

Mesure de l'oxygénation musculaire.

Les mesures d'oxygénation musculaire ont été réalisées à partir d'un appareil de spectroscopie du proche-infrarouge (NIRS). Le NIRO-200 (Hamamatsu photonics, Japan) utilisé dans cette étude est un système générant des ondes continues de 3 longueurs d'ondes différentes et enregistrant le retour du signal avec une fréquence de 5 Hz. Le NIRO-200 utilise une loi modifiée de Beer-Lambert pour quantifier la de-oxyhémoglobine (HHb) et l'oxyhémoglobine (HbO₂) et la méthode de spectroscopie à résolution spatiale pour déterminer un indice de saturation des tissus en O₂ (TOI, exprimé en %) et un indice de variation locale du flux sanguin (nTHI, sans unité) si l'on considère un taux d'hématocrite constant (Ferrari et coll. 2004).

Dans le cadre de cette étude, seules les variations de TOI et de nTHI seront analysées. Les variations de TOI reflètent la balance dynamique entre l'apport et la consommation en O₂. C'est le reflet de la saturation moyenne en O₂ du sang contenu dans les artérioles, les capillaires, les veines et les muscles présents sous la surface éclairée. La part de l'O₂ fixée

sur la myoglobine est incluse dans la mesure et ne peut pas en être dissociée. Les variations de nTHI permettent d'apprécier les modifications du flux sanguin.

Le NIRO-200 a été connecté au système Biopac MP150 afin de permettre une acquisition synchronisée des données du NIRS et des autres signaux (Force, EMG, Fc).

Reproductibilité

La reproductibilité des mesures de force sur le simulateur a été testée à posteriori. Initialement cette reproductibilité devait être testée sur les sessions de familiarisation. Cependant trop d'ajustements posturaux ont été effectués au cours de ces séances de familiarisation ce qui n'a pas permis de tester la reproductibilité dans de bonnes conditions. En conséquence, suite à deux sessions de familiarisation, le test de reproductibilité a été effectué sur un groupe de 8 joueurs avants n'ayant pas participé à ce protocole, sur 3 poussées maximales de 5 s entrecoupées de périodes de 6 min, afin de permettre une récupération complète. Ces données ont été traitées de façon identique à celles du protocole expérimental.

2.4 Calcul et traitement des données

Mesures physiologiques

VLa4 a été déterminée par interpolation linéaire entre les deux plus proches valeurs mesurées et exprimée en % de VMA (VLa4%). La vitesse correspondant à l'atteinte de $\dot{V}O_2$ max a été définie comme VMA.

Signal de Force

Le signal de force a été filtré à l'aide d'un filtre Butterworth passe bande sans décalage de phase (Passe Bas : 500 Hz ; Passe Haut : 5 Hz). La force résultante totale (F_{TOT}) a été calculée à partir des force antéro-postérieures (F_x) et verticales (F_z) enregistrée par les 3 capteurs de force positionnés sur les têtes du simulateur. Les forces médio-latérales ont été négligées car proches de 0. L'angle de la force résultante par rapport à l'axe antéro-postérieur a été calculé par une méthode trigonométrique selon la formule suivante :

$$Angle(^{\circ}) = \arccos\left(\frac{F_x}{F_{TOT}}\right) * \frac{180}{\pi}$$

Pour chaque répétition, le début de la phase de placement, le début de la phase de poussée, le début de la phase de plateau ainsi que la fin de la phase de poussée ont été définis subjectivement. La force moyenne (F_{moy} , en N) ainsi que l'angle de poussée moyen (Angle, en degré) ont été calculés pour chaque répétition sur la phase de plateau (entre les points 2 et 3, Figure 6). Le calcul de la durée de chaque période (poussée, récupération passive, placement) a été réalisé à partir de l'analyse des signaux de force.

Signal EMG

Le signal a été filtré à l'aide d'un filtre Butterworth passe bande de second ordre sans décalage de phase (Passe Bas : 500 Hz ; Passe Haut : 5 Hz).

Le signal EMG a ensuite été redressé par le calcul de la valeur de RootMean Square (RMS) et la fréquence moyenne du spectre EMG (Mean Power Frequency ; MPF) a été calculée à partir d'une transformée de fourrier rapide (FFT). Pour chaque répétition, les valeurs moyennes de RMS et de MPF ont été calculées pour chaque muscle sur la période correspondant au calcul de la force moyenne.

Après avoir vérifié que les données de force, d'angle et d'activité EMG pour chaque muscle (RMS et de MPF) n'étaient pas différentes, ces valeurs ont été moyennées deux par deux pour simplifier l'analyse des résultats et harmoniser avec les mesures de $\dot{V}O_2$.

La différence entre les deux premières (1-2) et les deux dernières (11-12) répétitions a été calculée pour la force ($\Delta Force$), l'angle ($\Delta Angle$), la RMS (ΔRMS) et la MPF (ΔMPF) pour chaque muscle et exprimé en % des deux premières répétitions.

Signaux issus du NIRS

Les signaux TOI et nTHI ont été filtrés à l'aide d'un filtre Butterworth passe bas de second ordre (fréquence de coupure : 1 Hz) sans décalage de phase.

Les valeurs de TOI et nTHI ont été moyennées sur une seconde avant le point correspondant au début de la phase de poussée (figure 6 ; point 1), à la fin de la phase de poussée (point 3) et à la fin de la récupération passive (avant le placement, point 5). Les valeurs minimales moyennes de TOI (TOI_{MIN}) et nTHI ($nTHI_{MIN}$) ont été déterminées pour chaque répétition en effectuant une moyenne sur 0,25 s de part et d'autre de la valeur minimale.

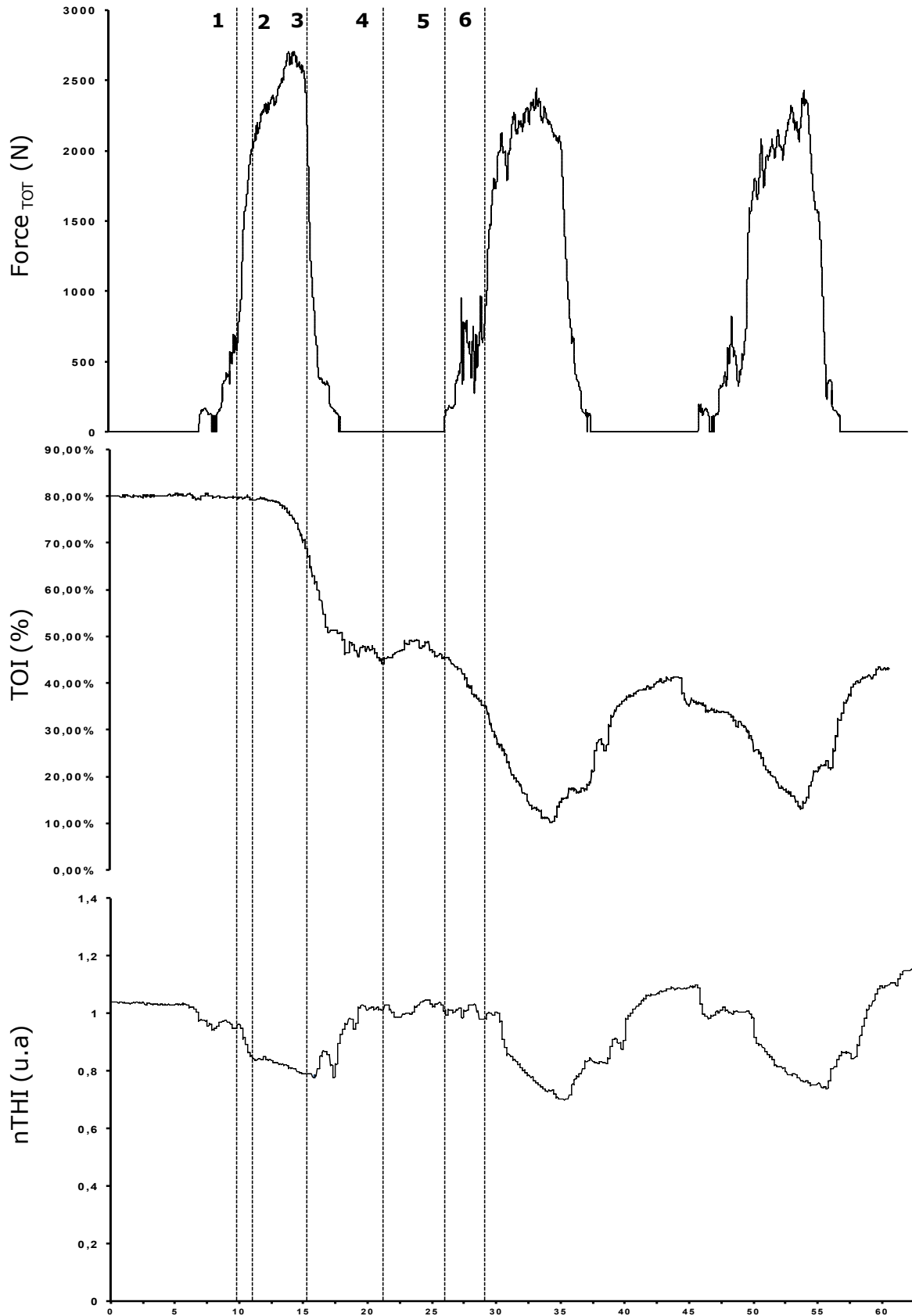


Figure 7 : Signaux de Force_{TOT}, TOI et nTHI pour un sujet. Point 1 : Début de la poussée. 2. Début de la phase de plateau 3 : Fin de la poussée. 4 : Temps auquel est TOI_{MIN}. 5 : Début du placement pour la poussée suivante. 6 : Début de la poussée suivante.

La durée entre la fin de la poussée identifiée sur le signal de force et la valeur minimale de TOI a été calculée ($TTOI_{MIN}$). Nous avons calculé les variations de TOI et de nTHI pendant la contraction (ΔTOI_{CONT} et $\Delta nTHI_{CONT}$ respectivement) et pendant la phase de récupération d'environ 15 s (ΔTOI_{RECUP}). Les variations de TOI pendant la récupération passive (environ 10 s) et la phase de placement (environ 5 s) ont été également calculées ($\Delta TOI_{RECUP10}$ et ΔTOI_{PLA} respectivement).

2.1 Analyses statistiques

Toutes les statistiques ont été réalisées à partir du logiciel Statistica (Statsoft, Tulsa, Oklahoma, USA). Les données sont exprimées sous la forme moyenne \pm écart-type.

D'après le test de Shapiro-Wilk, les paramètres étudiés étaient normalement distribués. De ce fait, l'effet de la répétition de sprint sur les différents paramètres étudiés a été analysé en utilisant une ANOVA à mesures répétées. Les mesures de corrélations ont été réalisées à partir de régressions linéaires simples, basées sur la méthode des moindres carrés. L'intervalle de confiance de l'ajustement est précisé sur les graphiques.

La reproductibilité entre les essais des mesures de force et d'angle de poussée a été testée par le calcul du coefficient de corrélation intra-classe (ICC). L'erreur typique de mesure a été calculée et est précisée pour information.

Le seuil de significativité a été fixé à $P < 0,05$.

3. Résultats.

3.1 Reproductibilité

L'ICC des mesures réalisées pour la force moyenne et l'angle moyen est de 0,8 et 0,94 respectivement. En accord avec les normes proposées par Vincent (1995), la reproductibilité des mesures est considérée comme modérée pour la force et élevée pour l'angle de poussée. La reproductibilité des mesures est confirmée par l'ANOVA à mesures répétées qui ne montre aucune différence significative entre les essais. L'erreur typique de mesure est de 4 % pour la force et de 7 % pour l'angle

3.2 Effectif de l'analyse

Sur les 17 joueurs ayant participé au protocole, seuls 11 joueurs ont été retenus pour l'analyse finale. En effet, l'analyse des données de force a démontré que 6 joueurs n'avaient pas respecté les consignes du protocole. Parmi eux, 5 joueurs démontrent un profil de force qui augmente progressivement et un autre un profil de force très irrégulier. Les 11 joueurs retenus sont ceux qui ont produit leur force maximale sur les deux premières répétitions. Les caractéristiques de ces 11 joueurs ($18,3 \pm 0,4$ ans ; $1,864 \pm 0,05$ m ; $102,4 \pm 10,7$ kg ; $\dot{V}O_{2\max}$, $4,9 \pm 0,4$ l.min⁻¹ ; $48,1 \pm 3,8$ ml.min⁻¹.kg⁻¹ ; VMA, $14,9 \pm 1,3$ km.h⁻¹ et VLa4%, $74,6 \pm 6,3$ %) sont similaires à celle du groupe initial.

3.3 Mesures de force.

Les durées moyennes pour la poussée, la récupération passive et le placement sont de $5,4 \pm 0,2$; $10,9 \pm 0,3$ et $3,7 \pm 0,2$ s respectivement. La durée de ces différentes phases ne varie pas de façon significative au cours des 12 répétitions. Les valeurs moyennes de F_{TOT} sont présentées sur la figure 7. La valeur moyenne pour les répétitions 1-2 est de (2134 ± 292 N) et la valeur maximale est de (2529 N). La force diminue de façon significative à partir des répétitions 5-6 (Δ Force de $-11,7 \pm 8$ %).

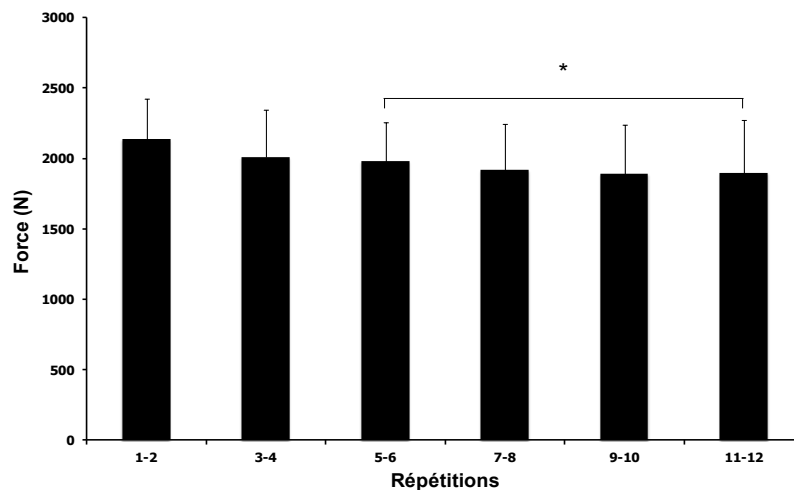


Figure 8. Evolution de la force totale en fonction des répétitions.

* Significativement inférieur aux répétitions 1-2

La figure 8 démontre que Fz et Fx diminue significativement au fil des répétitions. Fz diminue dès les répétitions 3-4 (ΔFz de $-20,7 \pm 13,5 \%$) et Fx à partir des répétitions 7-8 (ΔFx de $-10,41 \pm 7,7 \%$). Une diminution significative de l'angle de poussé concomitante à la diminution de Fz est observée (figure 9).

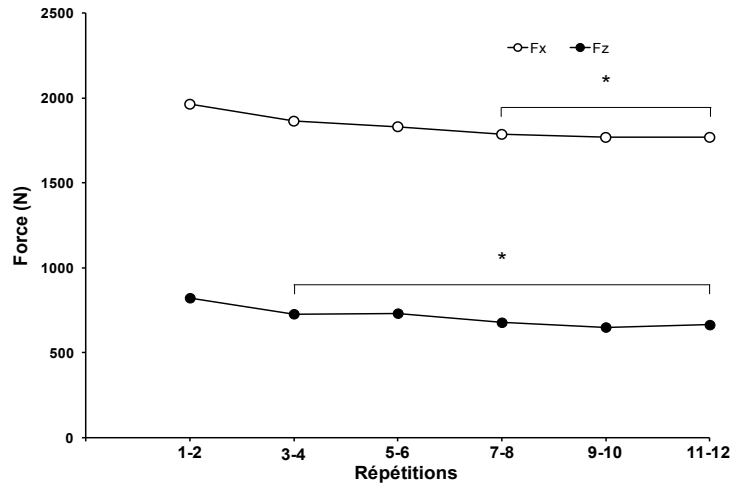


Figure 9. Evolution de la force en x (Fx) et en z (Fz) en fonction des répétitions.

* Significativement inférieur aux répétitions 1-2

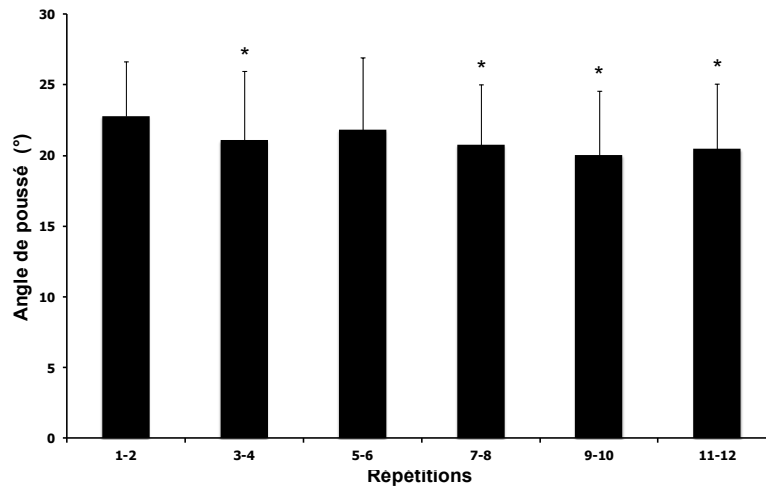


Figure 10. Evolution de l'angle de poussé en fonction des répétitions.

* Significativement inférieur aux répétitions 1-2

3.4 Mesures du signal EMG.

On observe une diminution significative de la valeur RMS pour le RF, le VL et le VM à partir des répétitions 7-8 jusqu'aux dernières répétitions (figure 10). Les valeurs moyennes de ΔRMS pour le RF, VL et VM sont de $-18,1 \pm 30,7$; $-13,6 \pm 18,3$ et $-19,1 \pm$

21,9 % respectivement. Aucune variation significative de la valeur RMS n'est observée pour le BF.

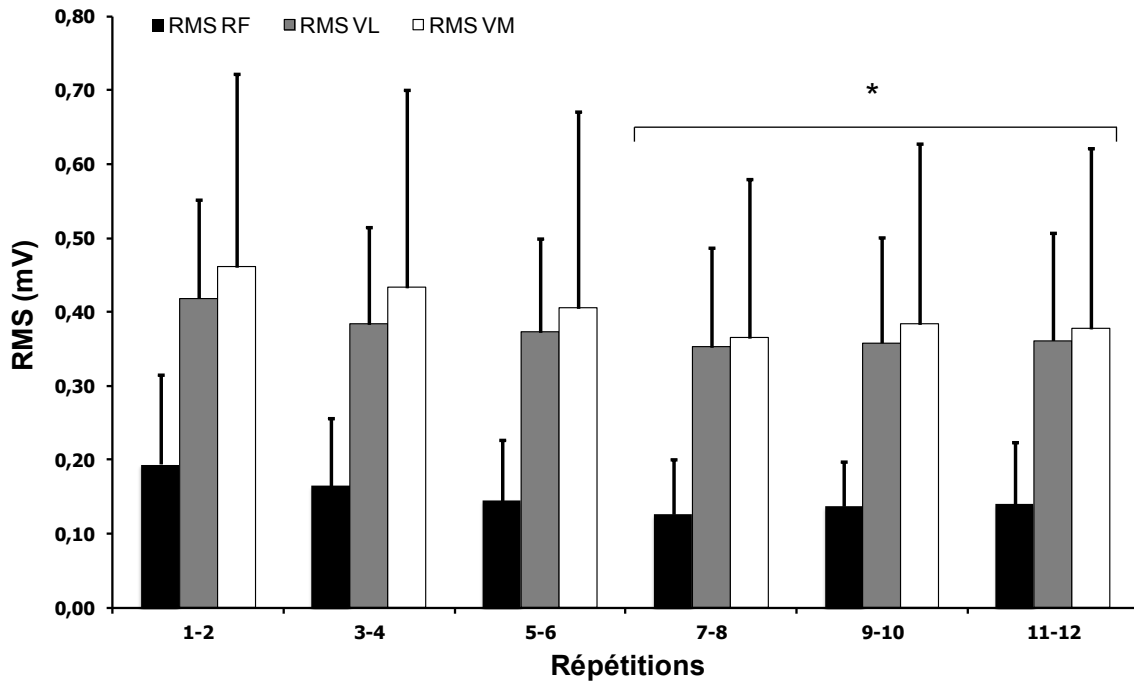


Figure 11. Evolution de la valeur RMS des muscles *rectus femoris* (RF), *vastus lateralis* (VL) et *vastus medialis* (VM) en fonction des répétitions. *. Significativement différent des répétitions 1-2

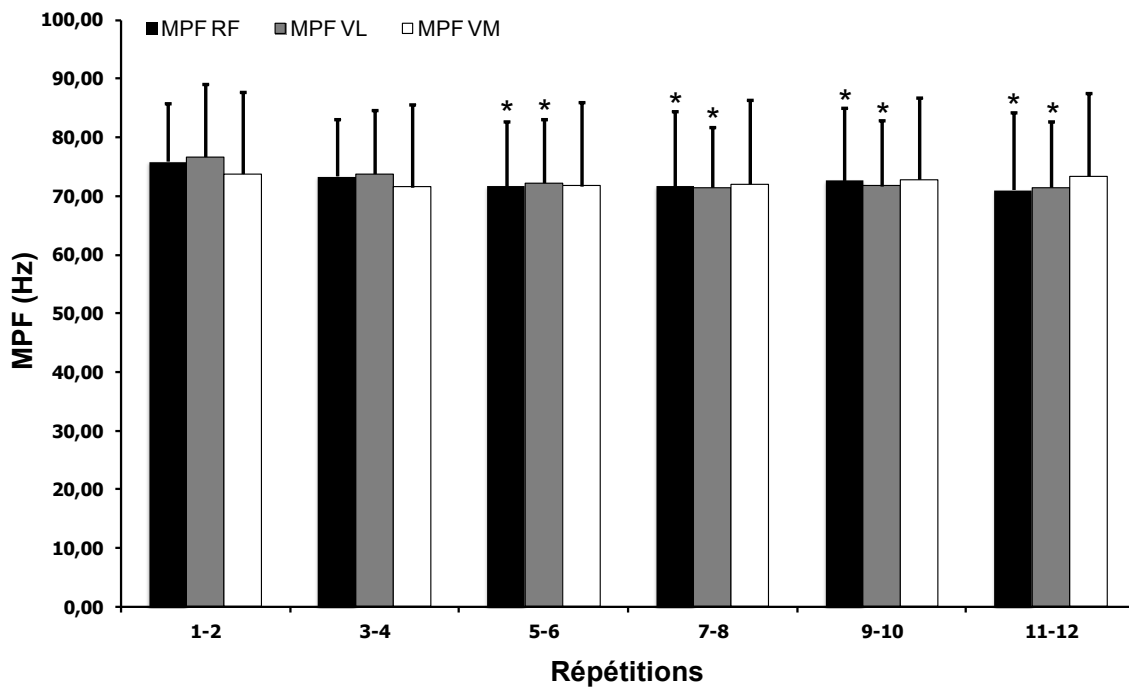


Figure 12. Evolution de la valeur MPF des muscles *rectus femoris* (RF), *vastus lateralis* (VL) et *vastus medialis* (VM) en fonction des répétitions. *. Significativement différent des répétitions 11-12.

L'analyse fréquentielle du signal a permis de mettre en évidence une diminution significative de la valeur MPF du RF et du VL à partir des répétitions 5-6 (figure 11). Les valeurs moyennes de Δ MPF pour le RF et le VL sont de $-6,6 \pm 5,6$ et $-6,7 \pm 3,8$ % respectivement. La valeur de MPF pour le VM et le BF ne varie pas de façon significative.

3.5 Consommation d'oxygène, Quotient respiratoire (QR), Fc et Lactate sanguin.

L'évolution de $\dot{V}O_2$ est présentée sur la figure 12. $\dot{V}O_2$ augmente significativement jusqu'aux répétitions 5-6 puis se stabilise ensuite. La valeur moyenne de $\dot{V}O_2$ atteinte sur la dernière mesure est de $2,46 \pm 0,28$ l.min⁻¹, cela représente $48,7 \pm 4,6$ % de $\dot{V}O_{2max}$ (étendue : 36,8 – 53,8 %). La valeur moyenne de QR observé sur la dernière mesure est de $0,94 \pm 0,08$ (étendue : 0,81-1,04). L'évolution de la Fc moy et de la fréquence cardiaque pic (Fc moy et Fc pic respectivement) sur les 40 s de mesure est présentée sur la figure 13. Fc moy augmente significativement jusqu'aux répétitions 9-10 et Fc pic augmente significativement jusqu'aux répétitions 7-8. Fc moy est systématiquement inférieure à Fc pic ($P < 0,001$) Lors des deux dernières répétitions Fc moy représente $73,5 \pm 6,3$ % de Fc max (étendue : 65-85 %) et Fc pic, $77,3 \pm 6,1$ % de Fc max (étendue 68,7 – 88 %). La valeur moyenne de $[La]_{s\ pic}$ est de $6,3 \pm 2,1$ mmol.l⁻¹ (étendue : 3,65 - 10).

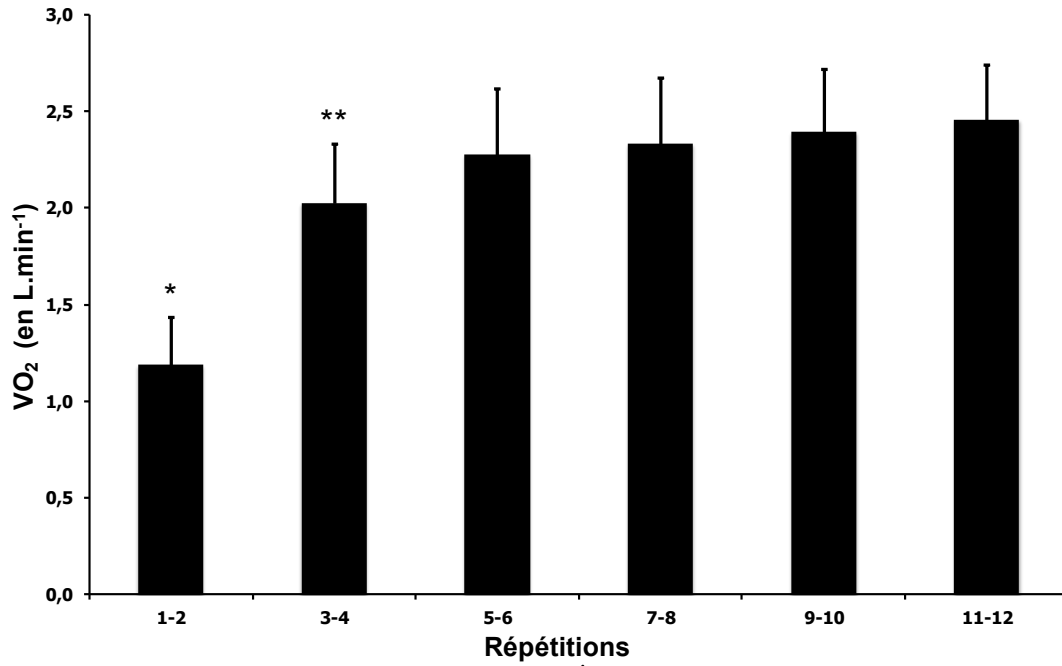


Figure 13. Evolution de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$, en l.min-1) en fonction des répétitions.

*. Significativement inférieur aux autres répétitions ; **. Significativement inférieur aux répétitions 5-6 à 11-12

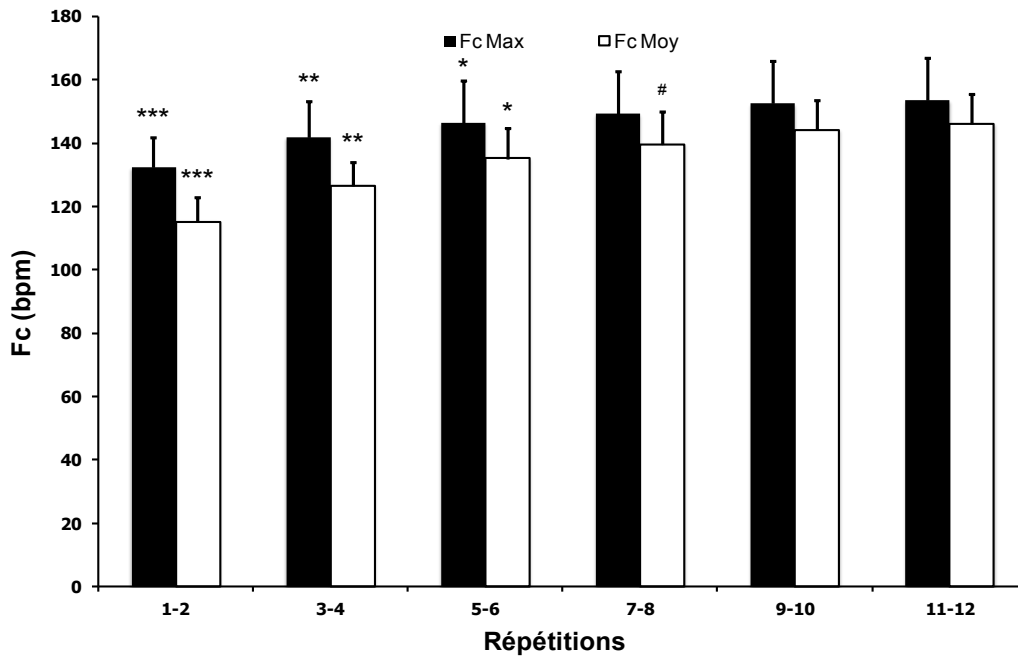


Figure 14. Evolution de la fréquence cardiaque moyenne (Fcmoy) et pic (Fc pic) en fonction des répétitions.

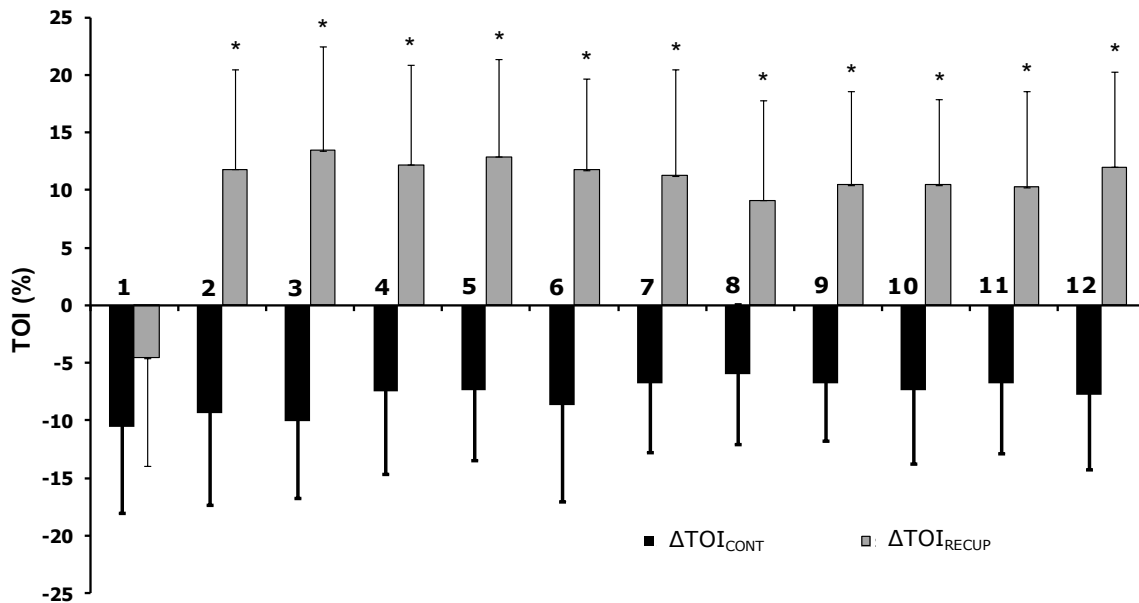
#. Significativement différent de 11-12. *. Significativement différent de 9-10 et 11-12. **. Significativement différent de 5-6 à 11-12. ***. Significativement différent des autres répétitions.

3.6 Oxygénation musculaire.

Cette analyse a été réalisée sur 9 joueurs car pour 2 joueurs les signaux étaient inexploitable.

Aucune variation significative du $\Delta\text{TOI}_{\text{CONT}}$ n'est observée au cours des répétitions (figure 15). $\Delta\text{TOI}_{\text{RECUP}}$ calculé pour la 1^{ère} répétition est significativement inférieur à celui des autres répétitions (figure 14). Lors de la récupération, le placement du sujet en position de poussée limite la récupération de l'oxygénation musculaire aux $10,9 \pm 0,7$ s de récupération passive. En effet, lors du placement, on observe une diminution moyenne de TOI de $3,4 \pm 3,3$ %. Cependant, l'ANOVA à mesures répétées ne montre aucune différence de $\Delta\text{TOI}_{\text{PLA}}$ au fil des répétitions. La figure 15 montre que TTOI_{MIN} (s) diminue significativement entre la 1^{ère} répétition ($4,3 \pm 2,3$ s) et les autres répétitions ($0,95 \pm 1,06$ s ; $P < 0,05$).

Figure 15. Evolution du delta de TOI pendant la contraction ($\Delta\text{TOI}_{\text{CONT}}$) et pendant la récupération ($\Delta\text{TOI}_{\text{RECUP}}$) en fonction des répétitions.



*. Significativement différent de la répétition 1.

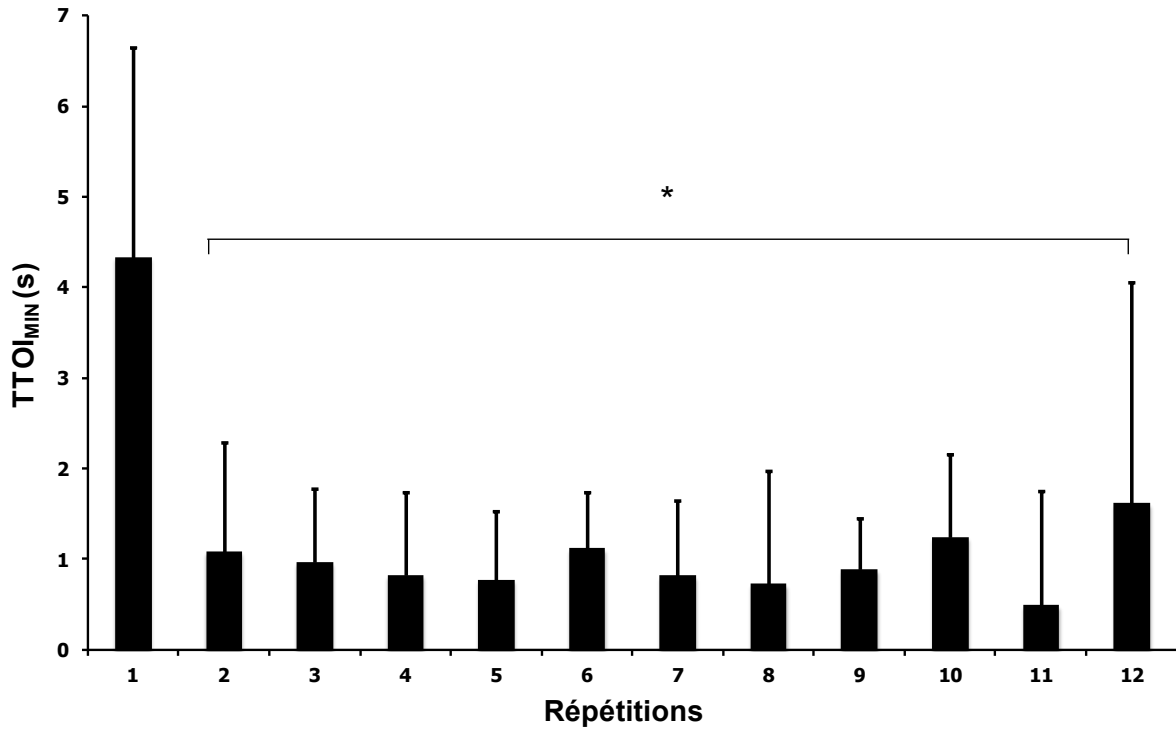


Figure 16. Evolution du temps d'atteint de TOI_{MIN} (TTOI_{MIN}) temps entre la fin de la contraction et le TOI_{MIN} en fonction des répétitions.

*. Significativement différent des répétitions 1-2.

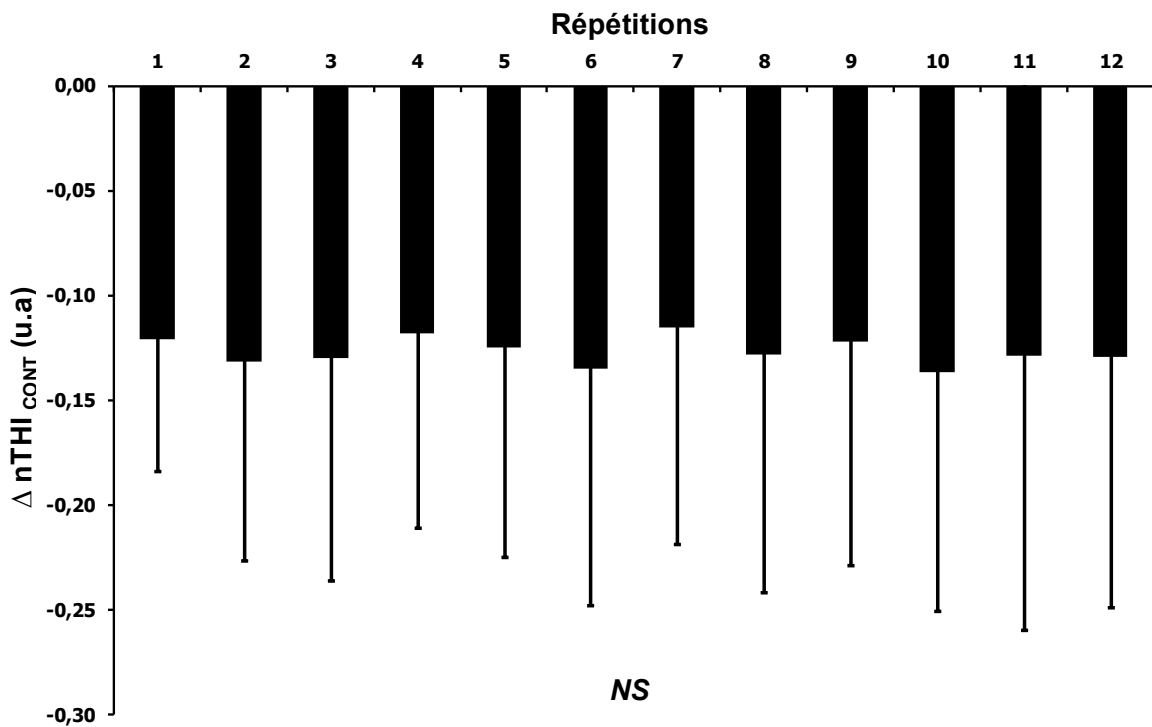


Figure 17. Evolution de nTHI pendant la contraction ($\Delta nTHI_{CONT}$) en fonction des répétitions.

L'analyse statistique ne démontre aucune différence significative de $\Delta nTHI_{CONT}$ entre les répétitions (figure 16). Cependant, on observe une augmentation significative du $nTHI_{MIN}$ de la répétition 1 ($0,81 \pm 0,12$) jusqu'à la répétition 5 ($0,87 \pm 0,13$; $P < 0,05$; figure 17), puis les valeurs se stabilisent.

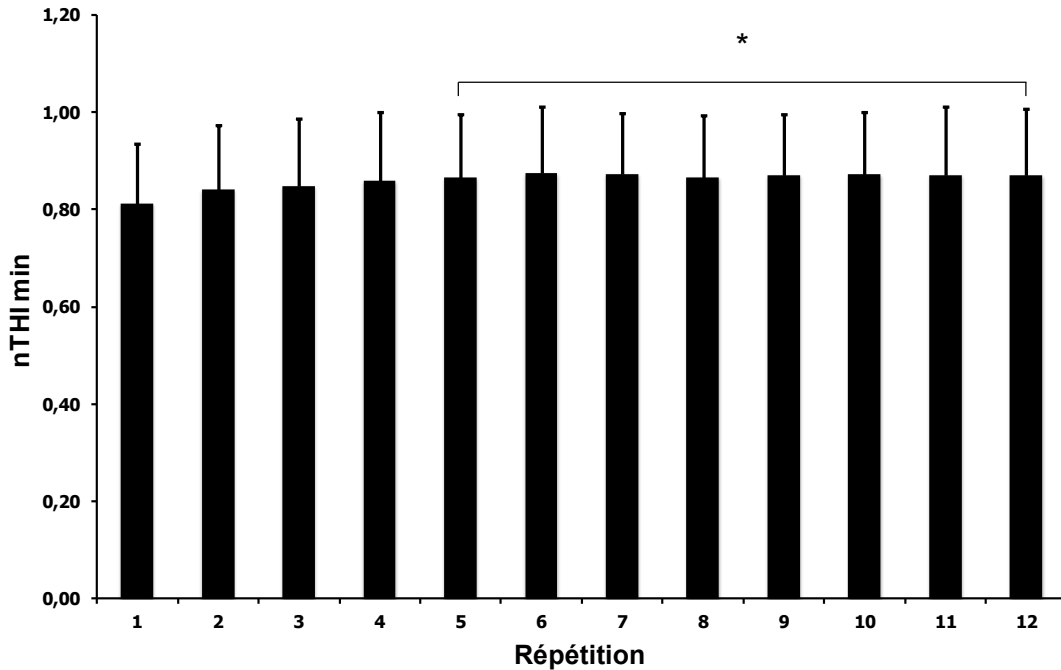


Figure 18. Evolution de la valeur minimale de nTHI ($nTHI_{MIN}$) en fonction des répétitions.

*. Significativement différent de la répétition 1.

3.7 Relation entre les variables.

Aucune corrélation significative n'a pu être mise en évidence entre ΔRMS ou ΔMPF pour les trois muscles du quadriceps et $\Delta Force$. Une relation significative est obtenue entre ΔRMS pour le BF et $\Delta Force$ ($r = 0,73$; $P < 0,01$; figure 19) et le ΔFz ($r = 0,74$; $P < 0,01$). Une tendance est observée entre ΔRMS du BF et $\Delta Angle$ ($r = 0,52$; $P = 0,057$). Aucune autre relation significative n'est mise en évidence entre ΔMPF de l'un des 3 muscles du quadriceps et du BF et les paramètres de force ou d'angle.

$[La]_{s\ pic}$ est positivement corrélé au QR observée à l'état stable sur les répétitions 11-12 (QR11-12) ($r = 0,75$; $P < 0,01$; figure 20) et $\Delta Force$ est significativement corrélé à $VLa4\%$ ($r = 0,57$; $P < 0,05$; figure 19).

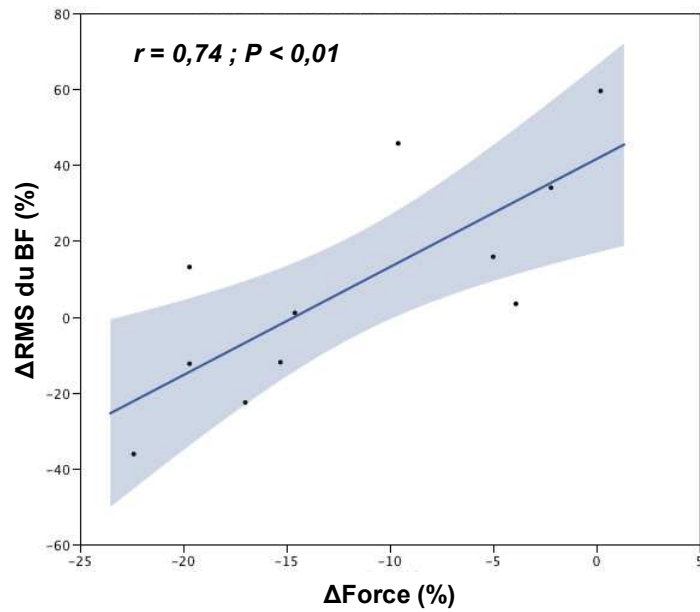


Figure 19. Relation entre la variation de RMS du BF (Δ RMS du BF (%)) et les variations de force (Δ Force (%)). En bleu, intervalle de confiance à 95% de l'ajustement linéaire.

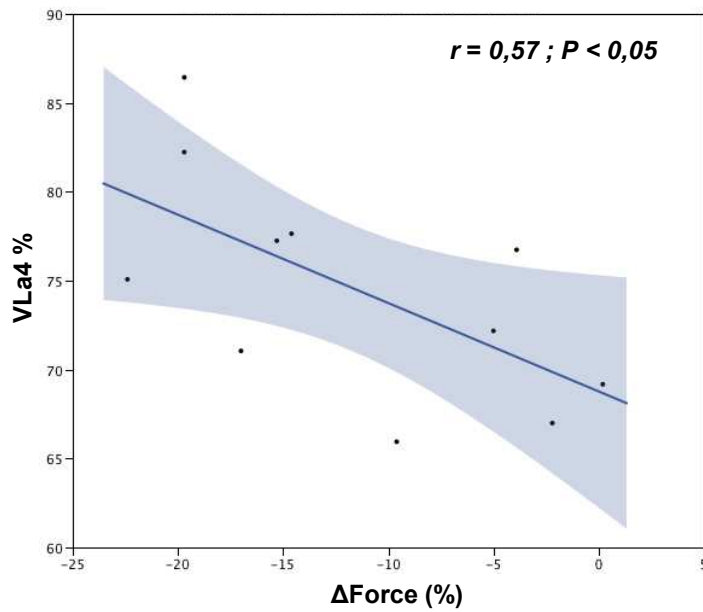


Figure 20. Relation entre la variation de force (Δ Force) et la vitesse à une lactatémie de 4 mmol.l⁻¹ exprimé en %VMA (VL44%). En bleu, intervalle de confiance à 95% de l'ajustement linéaire.

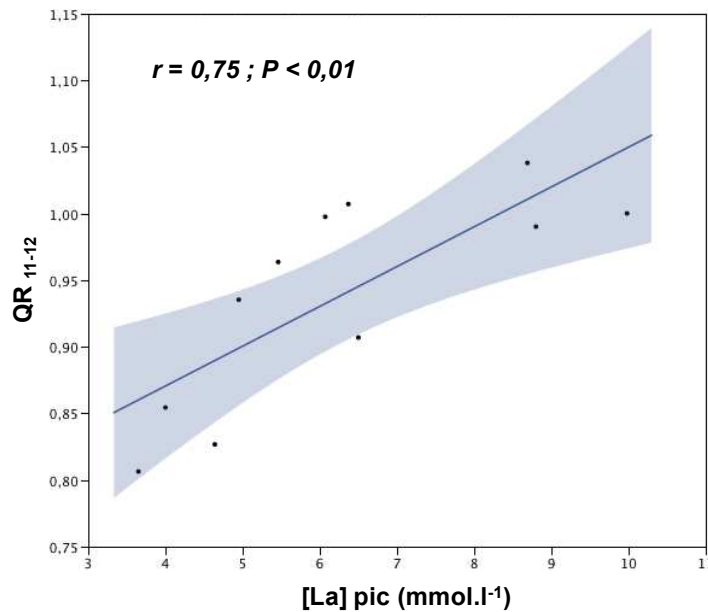


Figure 21. Relations entre la concentration en lactate pic ($[La]_{s\text{ pic}}$ (mmol.l⁻¹) et le quotient respiratoire moyen sur les répétitions 11-12 (QR₁₁₋₁₂). En bleu, intervalle de confiance à 95% de l'ajustement linéaire.

4. Discussion

4.1 Méthodes

La poussée en mêlée est un geste nécessitant la production d'un niveau élevé de force à l'impact et durant la poussée (Milburn 1993; Preatoni et coll. 2013; Quarrie et Wilson 2000; Wu et coll. 2007). Ce geste impliquant une masse musculaire importante est réalisé en chaîne fermée ce qui implique, lors d'une simulation de mêlée statique, une bonne stabilisation des articulations du membre inférieur et de l'angle entre les cuisses et le tronc ainsi qu'une bonne rigidité de ce dernier afin que la force soit transmise efficacement. En résumé, cet exercice nécessite un niveau élevé de coordination. Les joueurs recrutés dans cette étude sont familiers de ce type d'exercice dans le cadre du jeu et de leur entraînement et ils ont été familiarisés avec le geste de poussée contre le simulateur. Néanmoins le test de reproductibilité démontre que cette dernière est modérée. On peut émettre l'hypothèse que ce niveau modéré de reproductibilité est lié à la complexité et à la difficulté de la tâche. D'autre part, 6 joueurs sur 17 n'ont pas respecté les consignes du protocole et ont

été exclus de l'analyse. L'analyse du profil de force de ces joueurs démontre soit une augmentation progressive de la force ou bien une augmentation significative de la force sur les dernières répétitions. Ce comportement tend à démontrer que ce sont mis en place une stratégie, consciente ou non, d'autorégulation (Abbiss et Laursen 2008). Une étude récente de Billaut et coll. (2011) démontre que ce phénomène influence significativement la performance lors de sprints répétés et qu'il dépend de la connaissance ou non par le sujet du nombre de répétitions à effectuer. On peut également émettre l'hypothèse que les expérimentateurs n'ont pas expliqué suffisamment clairement le protocole et/ou que ces joueurs n'ont pas compris les explications.

Initialement nous avons prévu de calculer $\dot{V}O_2$ correspondant au seuil lactique et de l'exprimer en % de $\dot{V}O_{2max}$. Néanmoins, l'analyse des cinétiques lactiques démontre que, pour la plupart des sujets, le seuil 4 mmol.l^{-1} se situe entre la vitesse d'échauffement et la vitesse correspondant au premier palier du test incrémental. Or nous n'avons pas effectué de mesure de $\dot{V}O_2$ sur le palier d'échauffement. En conséquence, nous avons calculé la vitesse correspondant à ce seuil lactique. Ceci permet par ailleurs une comparaison avec les résultats de l'étude 1.

4.2 Caractéristiques anthropométrique et physiologique

Le groupe de joueurs initialement recrutés démontre des dimensions corporelles en accord avec celles observées pour les avants du XV de France et présentées dans l'étude 1. Ces caractéristiques sont similaires aux joueurs avant de niveau international présentées dans différentes études (Fuller et coll. 2012; Higham et coll. 2013; Quarrie et coll. 1996; Sedeaud et coll. 2012; Warrington et coll. 2001).

Les études présentant les caractéristiques physiologiques des joueurs de rugby de haut niveau sont rares (*e.g.* Duthie 2003). Peu d'études ont mesuré $\dot{V}O_{2max}$ et aucune le seuil lactique. En rugby, l'évaluation de l'aptitude physique est appréciée par l'analyse de la performance globale obtenue lors de tests de terrain (Higham et coll. 2013; Quarrie et coll. 1996). A notre connaissance seule l'étude de Warrington et coll. (2001) présentent des

valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ mesurées et obtenues lors d'une évaluation sur tapis roulant dans un groupe de 20 avants irlandais internationaux. La valeur moyenne de $\dot{V}O_{2\max}$ était de 5,3 l.min⁻¹, soit 51,1 ml.min⁻¹.kg⁻¹. Ces données sont en accord avec les valeurs moyennes de 4,9 l.min⁻¹ et 48,0 ml.min⁻¹.kg⁻¹ obtenues dans notre groupe. Les valeurs de VMA du groupe de cette étude ne sont pas significativement différentes de celles obtenues dans le même groupe de poste évoluant au sein du XV de France. Curieusement et à notre connaissance aucune étude concernant le rugby ne présente de valeur de VMA. En ce qui concerne VLa4%, les joueurs du XV présentent des valeurs significativement supérieures d'environ 5 %. Cette différence peut être justifiée par différentes raisons : le XV a été testé en novembre alors que notre groupe a été testé en Août, à la reprise de l'entraînement et/ou cette différence est liée au protocole (TUB2 pour le XV) et/ou au type d'exercice (course sur piste pour le XV) et/ou au nombre d'années d'entraînement supérieur pour les joueurs du XV de France.

A notre connaissance seule l'étude de Wu et coll. (2007) présentent des valeurs de force correspondant à des poussées individuelles simulant une mêlée. Cette étude concernait 10 rugbymen de niveau national, mesurant en moyenne 1,77 m et pesant 85,5 kg. En conséquence, la valeur moyenne de force d'environ 1000 N obtenues dans l'étude de Wu et coll. (2007) sont très inférieures à celle du groupe étudié dans la présente étude (2134 ± 292 N).

Cette analyse de la littérature concernant les caractéristiques physiologiques souligne le manque d'intérêt actuel et/ou le manque de moyen pour l'évaluation des qualités physiologiques spécifiques du rugbyman professionnel.

4.3 Diminution de la force

Nos résultats démontrent une diminution moyenne de 11,7 % de la force produite lors d'un exercice simulant la répétition de 12 poussées maximales en mêlées. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus lors de répétition de sprints dont la durée d'exercice était similaire. Balsom et coll. (1992b; 1992a) rapportent des diminutions de performance de 11 % à l'issue de 15 sprints de 40 m (durée moyenne 5,50 s) entrecoupés de 30 s de

récupération. De même, Hautier et coll. (2000) observent une diminution de 11,3 % de la puissance moyenne lors d'une répétition de 15 sprints de 5 s sur bicyclette ergométrique (récupération 25 s). Les études citées ci-dessus ont utilisé des durées d'effort similaires (environ 5 s) mais des ratios inférieurs, de l'ordre de 1:5 à 1:6. Si l'on considère l'importance de la durée de la récupération sur la performance lors d'exercice intermittent (Åstrand et coll. 1960; Balsom et coll. 1992b), on peut supposer que, dans le cadre de notre protocole, la diminution de performance aurait été plus faible voire inexistante dans une configuration 1:5-1:6.

Cette moindre fatigue lors de l'exercice statique répété pourrait s'expliquer par le faible coût énergétique de ce type de contraction. Il a été démontré que la contraction isométrique avait un coût énergétique inférieur à celui de la contraction concentrique pour un moment de force donné (Elder et coll. 2006; Ryschon et coll. 1997). Les valeurs de $\dot{V}O_2$ mesurées confirment le faible coût énergétique de la contraction isométrique. En effet, ces valeurs, mesurées à l'état stable, représentent en moyenne 48,7 % de $\dot{V}O_{2\max}$. Cette valeur relative est inférieure aux valeurs généralement comprises entre 60 et 70 % de $\dot{V}O_{2\max}$, mesurées lors de séries de sprint de 5 s entrecoupées de périodes de récupération passive variant de 24 à 30 s (Balsom et coll. 1992a; Hamilton et coll. 1991; Tomlin et Wenger 2002). En lien avec ce moindre coût énergétique de la contraction isométrique, l'étude de Ryschon et coll. (1997) démontrent que, pour un même moment de force et une même durée de contraction (5 s), la dégradation de PCr est plus importante suite à une contraction dynamique que lors d'une contraction de type isométrique. La dégradation des stocks de PCr étant le principal facteur limitant le maintien de la performance lors de l'exercice bref et intense, on peut supposer que cette fatigue moins importante est liée à une moindre dégradation des stocks de PCr lors de l'exercice statique intermittent.

La figure 8 démontre que les composantes Fx et Fz qui déterminent la force totale diminuent toutes les deux de façon significative. Fz diminue plus que Fx (-20,7 vs -10,41 %). Fz diminue dès les répétitions 3-4 alors que Fx diminue de façon significative à partir des répétitions 7-8. Il est intéressant de noter que les diminutions significatives de Fx et de la force totale sont concomitantes, celles de Fz et de l'angle de poussée également. Ces résultats sont liés au fait que Fz représente une part faible de la force totale dans ce type de

mouvement : les valeurs de F_x sont environ 2,8 fois supérieures à celles de F_z . En conséquence, sur les premières répétitions la diminution de F_z n'influence pas significativement la force totale.

4.4 Fatigue et EMG

Les valeurs de RMS pour le VL, RF et le VM diminuent de 18,1, 13,6 et 19,1 % respectivement. Cette diminution du signal RMS lors d'un exercice intermittent, concomitante de la diminution de performance, est en accord avec les études de Billaut et coll. (2010) et de Mendez-Villanueva et coll. (2008; 2007). Une diminution significative de la valeur de MPF est observée pour le RF et le VL (6,4 et 6,8 % respectivement). Cependant, les valeurs de MPF pour le BF et le VM ne varient pas de façon significative. Cette absence de variation significative pour le VM est en accord avec l'étude de Ebenbicher et coll. (1998) qui ont étudié la fatigue lors d'une série d'extensions isométrique de la jambe à 3 intensités correspondant à 30, 50 et 70 % de la CMV. Leurs résultats démontrent que VM est le muscle le moins fatigable et cette moindre fatigabilité serait la conséquence d'un % de fibres de type I plus important dans le VM (Johnson et coll. 1973) par rapport aux autres muscles du quadriceps. Ces auteurs présentent un autre résultat intéressant. La valeur RMS du RF augmente légèrement entre 30 et 50 % de CMV et diminue significativement à 70 % de CMV alors que pour VL et VM elle augmente régulièrement. L'analyse de l'évolution des valeurs RMS pour le VL, le VM et le RF conduit les auteurs à la conclusion que l'activation du RF, qui est un muscle bi-articulaire, n'est pas contrôlée de la même façon que les muscles mono articulaires que sont le VL et le VM en situation de fatigue isométrique.

L'analyse de la littérature démontre que l'interprétation des variations du signal EMG pendant l'exercice est limitée car elle dépend du protocole, du type d'exercice, de l'intensité et des groupes musculaires impliqués. Cette diminution simultanément des valeurs RMS et MPF des muscles du quadriceps indique néanmoins une diminution du niveau d'activation de ces muscles. Cette diminution d'activation peut-être liée à la fatigue et/ou à une modification de la stratégie de recrutement. Pour dissocier la part des deux phénomènes dans la diminution d'activation il aurait fallu réaliser des mesures complémentaires

comme celles proposées par Racinais et coll. (2007) et Perrey et coll. (2010). Ces variations des valeurs de signal EMG (RMS ou MPF) quel que soit le muscle ne sont pas statistiquement reliées à Δ force.

L'analyse du signal EMG permet également de comprendre la façon dont le mouvement est contrôlé. Les résultats ne démontrent aucune diminution significative de la valeur RMS du BF mais par contre Δ RMS du BF est significativement corrélé à Δ Force. Les joueurs capables de maintenir le niveau de force en poussée sont ceux qui augmentent le plus leur valeur RMS du BF. En effet, la poussée contre le simulateur est un exercice en chaîne fermée. Dans ces conditions, le BF peut agir également comme extenseur du genou lorsqu'il se contracte. Il semblerait donc que, lorsque le niveau d'activation des 3 muscles du quadriceps diminue, il y ait une compensation par activation du BF pour maintenir le niveau de force. La figure 18 montre cette relation entre Δ Force et Δ RMS du BF. On observe une grande variabilité des variations de la valeur Δ RMS du BF (entre -36 et +59,5 %). Il est difficile d'interpréter cette variabilité importante sans connaître le niveau d'activation initial relatif (exprimé en % de CMV) de ce muscle. Par contre, on peut conclure que l'activation de ce muscle semble importante pour maintenir le niveau de force lors de l'exercice statique répété. On observe également une corrélation significative entre Δ RMS BF et l'angle de poussée. Le BF étant également extenseur de hanche l'augmentation de son niveau d'activation permettrait également de maintenir l'angle de poussée. La diminution de l'angle de poussée au cours des répétitions n'est pas statistiquement liée à la diminution de force. Cette diminution précoce de l'angle pourrait être le témoin d'une adaptation posturale consécutive à une fatigue spécifique des muscles fessiers et/ou des muscles posturaux du tronc qui influencerait plus spécifiquement F_z . Ce résultat tend à suggérer différents niveaux de résistance à la fatigue en fonction des groupes musculaires.

Cette analyse souligne la complexité du contrôle du geste de poussée contre le simulateur. Elle ouvre également des perspectives d'étude du contrôle du mouvement de poussée en mêlée par l'analyse du niveau d'activation relatif de l'ensemble des groupes musculaires impliqués ainsi que leur évolution en situation de fatigue.

4.5 Fatigue et facteurs métaboliques

La figure 6 décrit l'évolution typique du TOI pendant les trois premières répétitions. Cetto et coll. (2007) ont observé que le temps à partir duquel TOI commence à diminuer pendant la contraction du VL variait en fonction des sujets lors d'un exercice isométrique maximal de 4 s sur une presse. Nous n'avons pas pu observer ce phénomène en raison de la phase de placement qui initiait, dans la plupart de cas, une diminution de TOI avant le début de la contraction. Cette phase de placement indispensable a réduit la durée de récupération passive à 10,9 s en moyenne. En termes de récupération réelle par rapport à la re-oxygénation, cela implique que nous sommes dans une configuration de ratio 1:2 plutôt que 1:3. Lors de la première répétition nous observons que la de-oxygénation observée pendant la contraction se poursuit pendant la première partie de la récupération. En conséquence le temps auquel on observe le TOI_{MIN} est largement supérieur au temps de contraction (figure 15). Cette diminution de TOI pendant la première récupération indique une consommation d' O_2 supérieure aux apports qui va permettre la resynthèse de la PCr. L'augmentation de TOI pendant la deuxième phase de la première récupération témoigne d'une adaptation permettant une augmentation des apports en O_2 . Cette hypothèse est confirmée par le fait que, comme le montre la figure 17, $nTHI_{MIN}$ qui témoigne des variations du flux sanguin, augmente progressivement pour atteindre un état stable à partir de la 5^{ème} répétition. Cette inadéquation entre les apports et l'extraction de l' O_2 pendant la 1^{ère} phase de récupération se traduit par un ΔTOI_{RECUP} négatif (figure 14). Le ΔTOI_{CONT} ne varie pas significativement au fil des répétitions. Dès la deuxième répétition, on atteint le TOI_{MIN} et on observe un équilibre entre la de-oxygénation et la re-oxygénation. Cet équilibre atteint dès la deuxième répétition indique que des adaptations locales du débit sanguin ont permis d'augmenter localement le flux sanguin. Cette interprétation est en accord avec l'étude de Kinding et coll. (2002) qui démontre que le flux sanguin dans les capillaires du muscle spinothoracicus de rat augmente dès la première seconde d'exercice pour atteindre un état stable vers 30-45 s.

Nos résultats sont en accord avec l'évolution de TOI généralement observée lors de la répétition de sprints (Billaut et Buchheit 2013; Racinais et coll. 2007; Smith et Billaut 2010; Buchheit 2010) et témoignent du fait qu'en dépit de la diminution de la saturation du

muscle en O_2 , la quantité d' O_2 extraite par le muscle est constante tout au long des répétitions. Cela suggère également que la consommation d' O_2 par le VL n'est pas limitée dans le cadre de notre protocole par les adaptations centrales du débit cardiaque qui, comme le démontre l'analyse de l'évolution de la Fc lors des répétitions, semble atteindre un pseudo état stable à partir des répétitions 9-10.

La fatigue lors de l'exercice isométrique continu a souvent été associée au fait que, lors de ce type d'exercice, le flux sanguin est perturbé voire interrompu (Ahlborg et coll. 1972; Cerretelli et coll. 1976; Kimura et coll. 2006; Sjøgaard et coll. 1988). Cettolo et coll. (2007) montrent que dès le début de la contraction, tHb, autre témoin des variations du volume sanguin, diminue très rapidement pour atteindre un plateau pendant la contraction. Ceci indique clairement une occlusion du flux sanguin dans le VL lors d'une CMV sous presse. L'analyse de notre signal nTHI ne permet pas de conclure que le flux sanguin est interrompu. En effet, comme le montre la figure 6, le flux diminue progressivement pendant chaque contraction et le $\Delta nTHI_{CONT}$ ne varie pas au fil des contractions. Il a été démontré que le flux sanguin pouvait être interrompu dans le VL pour des niveaux de force proche de 65 % de CMV (Sadamoto et coll. 1983). L'analyse de nos résultats tendrait à suggérer que le VL n'est pas recruté à son intensité maximale et que cette intensité pourrait être inférieure à 65 % de CMV. Cette hypothèse est plausible si l'on considère que l'exercice réalisé implique un grand nombre de groupe musculaire. Le signal réceptionné par le NIRS est influencé par l'épaisseur de la masse grasse. La relation est de type polynomiale et démontre qu'à partir de 6 mm d'épaisseur de tissu adipeux, la réception du signal est significativement modifiée (Yang et coll. 2005). Le NIRS que nous avons utilisé ne permettait pas de corriger l'influence de l'épaisseur du tissu adipeux sur le signal et cette épaisseur varie entre 3,4 et 8 mm dans la population étudiée. En conséquence, nous ne pouvons pas réaliser de comparaisons interindividuelles dans le cadre de cette étude.

La participation de la glycolyse à la resynthèse de l'ATP n'a pas été appréciée directement au niveau du muscle pour des raisons méthodologiques. Nous avons néanmoins déterminé $[La]_{s\ pic}$ à l'aide d'une cinétique réalisée à l'issue de la répétition des 12 poussées. La valeur moyenne de $[La]_{s\ pic}$ est relativement basse (6,3 mmol.l⁻¹). La figure 20 montre que les valeurs de $[La]_{s\ pic}$ varient beaucoup et que ces valeurs sont positivement corrélées à la valeur du QR correspondant à l'état stable de la consommation d' O_2 . En accord avec le fait que les protons sont évacués de la cellule musculaire avec le lactate grâce à un

symport, une valeur de QR élevée associée à un $[La]_{s\text{ pic}}$ élevé, indiquerait qu'une part du CO_2 déterminant le QR est d'origine non métabolique, provenant des bicarbonates qui permettent de tamponner les protons. Néanmoins la valeur maximale moyenne de QR à l'issue de la répétition de sprint est de 0,94 et la valeur la plus élevée de 1,04. Ces valeurs de QR, relativement faibles, témoignent d'une faible accumulation des protons dans le compartiment sanguin. Ce résultat suggère que la diminution de performance ne serait pas liée à une diminution du pH sanguin. Cette suggestion est en désaccord avec l'étude Bishop et coll. (2003). Cette divergence de résultat est sans doute liée au fait que, dans leur étude, la réalisation de 5 sprints de 6 s (récupération 24 s) dans un groupe de 14 femmes spécialistes de hockey conduit à un $[La]_{s\text{ pic}}$ de 11,3 $mmol.l^{-1}$ en moyenne.

A l'instar de la plupart des études, nous n'obtenons aucune relation significative entre $\Delta Force$ et $\dot{V}O_{2\text{ max}}$ (Bishop et coll. 2003; Castagna et coll. 2007; Glaister et coll. 2006; Smith et Billaut 2010; Wadley et Le Rossignol 1998). L'ensemble des résultats de cette étude suggère, comme l'ensemble des études sur le sujet citées dans la revue de Girard et coll. (2011), que la diminution de performance est principalement liée à des facteurs périphériques et notamment à l'aptitude à consommer de l' O_2 qui serait le reflet de la capacité oxydative. Il est généralement admis que le seuil lactique est un indice de la capacité oxydative qui est déterminante lors de la performance d'endurance. Un seuil lactique exprimé en % de VMA élevé serait le témoin d'une capacité oxydative importante. En conséquence, une valeur de seuil lactique (exprimé en % de VMA) élevé devrait être associée à une moindre diminution de performance dans le cadre de notre protocole. En accord avec cette hypothèse, Bogdanis et coll. (1996a) démontre une relation significative entre le seuil 4 $mmol.l^{-1}$ exprimé en % de $\dot{V}O_{2\text{ max}}$ et le % de PCr resynthétisé à l'issue de 4 min de récupération suivant un sprint maximal de 30 s dans un groupe de 7 étudiants actifs. La figure 19 démontre une relation significative entre $\Delta Force$ et VLa4%. Néanmoins cette relation n'est pas conforme à notre hypothèse initiale. En effet, une valeur de VLa4% élevée est associée à une valeur de $\Delta Force$ élevée. Ce résultat surprenant peut être le fruit du hasard et souligne la limite de l'analyse statistique et de son interprétation dans un petit groupe de sujet. Cependant VLa4% est également liée à $[La]_{s\text{ pic}}$. L'ensemble de ces paramètres suggère que la capillarisation pourrait être le facteur limitant la performance dans notre groupe. En effet, un réseau capillaire dense permettra les échanges de lactate

entre le muscle et le sang. Si cette relation entre Δ Force et $V_{La4\%}$ n'est pas due au hasard, on peut émettre l'hypothèse que, dans le groupe étudié, une valeur de $V_{La4\%}$ élevée reflète une incapacité à échanger le lactate et donc les protons en raison d'une faible capillarisation. Cette hypothèse signifierait que dans le groupe étudié, $V_{La4\%}$ ne serait pas le témoin de la capacité oxydative.

En conclusion, le modèle de fatigue lors de répétitions d'exercice statique choisit dans cette étude démontre une diminution de force relativement faible au regard de la difficulté du protocole (exercice 5 s, ratio 1:3). La principale raison de cette moindre diminution est le faible coût énergétique associé à la contraction isométrique. Notre hypothèse initiale qui était que l'aptitude à répéter des exercices statiques était liée à la capacité oxydative n'a pas pu être validée.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif général de ce projet était d'analyser l'activité lors de compétitions de niveau international en rugby à XV et d'explorer l'évolution du niveau d'activité au cours du match pour quantifier la fatigue. Dans une première étude, nous avons démontré que le niveau d'activité ne variait pas de façon significative au cours du match si l'on quantifiait l'activité par l'analyse de la vitesse et du rapport entre la durée d'activité et la durée de la récupération. Par contre, on observe une diminution significative de l'accélération moyenne sur la deuxième mi-temps, cette diminution étant plus particulièrement marquée pour le groupe constitué des troisièmes lignes et des talonneurs. Cette première étude démontre que les critères généralement considérés pour analyser l'activité en rugby (distance parcourue et temps passé dans différente zone de vitesse) semblent ne pas être pertinents pour quantifier la sollicitation énergétique et apprécier la fatigue. La mesure et l'analyse de l'accélération devraient être intégrées dans l'analyse de la tâche. Ceci implique le développement d'outils spécifiques valides. Cet objectif est en cours de validation dans le cadre du développement de l'outil GPS qui peut être couplé à des accéléromètres ou des centrales inertiels initialement prévues pour quantifier les impacts. Cette approche ouvre de nouvelles perspectives dans l'analyse de la tâche en rugby voire dans d'autres disciplines. En effet, dans le cadre d'activité intermittente la qualité d'accélération et de l'aptitude à répéter ces accélérations sont des qualités fondamentales qui doivent être spécifiquement évaluées et améliorées dans le cadre de l'entraînement. L'analyse de la vitesse initiale à ces accélérations (majoritairement arrêté pour les avants et lancé pour les arrières) et de la distribution des ratios apporte une information complémentaire pour mettre en place des exercices spécifiques à chaque poste.

L'analyse conduite dans cette première étude ne permettait pas d'apprécier la fatigue consécutive aux exercices statiques. Dans une deuxième étude, nous avons proposé d'étudier la fatigue lors de 12 répétitions d'exercice statique simulant la poussée en mêlée. Les résultats démontrent une diminution significative de la force produite mais relativement faible si l'on considère le protocole qui consistait à répéter 12 fois 5 s de poussée maximale entrecoupées de périodes de récupération de 15 s. Cette légère diminution de performance dans un protocole extrême par rapport aux conditions réelles de la compétition confirme les résultats de l'étude précédente et de la littérature en ce qui concerne l'absence de diminution de l'activité globale au cours du match. L'ensemble de ces résultats suggère

que l'enchaînement des séquences de jeu statiques et dynamiques et des périodes de récupération lors d'une compétition internationale permet de maintenir le niveau d'activité de l'équipe.

Néanmoins à travers cette analyse globale nous n'avons pas répondu à une question essentielle pour la préparation physique des joueurs : l'aptitude physiologique des joueurs, que l'on peut apprécier par la mesure de $\dot{V}O_{2\max}$, de V_{Ia4} ou des mesures de force et de puissance, est-elle un facteur limitant de la performance ? En l'absence de fatigue on pourrait conclure que l'aptitude physiologique des joueurs étudiés était suffisante. Néanmoins l'étude statistique ne permet pas de mettre en évidence la fatigue d'un joueur au sein du groupe. Dans cet objectif il faudra analyser les variations du niveau d'activité lors des compétitions et analyser ces variations en rapport avec l'aptitude physiologique de chaque joueur.

Dans la deuxième étude, nous avons choisi d'étudier le mouvement le plus proche des conditions de jeu afin d'apprécier les mécanismes associés à la fatigue lors de l'exercice statique pour répondre à la problématique générale de cette étude. La complexité du geste étudié et le faible nombre de muscles étudiés limite l'analyse et l'interprétation des mécanismes de fatigue dans ce type de mouvement. Néanmoins cette étude ouvre des perspectives de recherche. Dans un premier temps, le contrôle du mouvement lors de la poussée en mêlée doit faire l'objet d'une étude spécifique. Dans le cadre de cette étude, le niveau de sollicitation des principaux groupes musculaires impliqués dans la poussée en mêlée devra être évalué ainsi que la modification du recrutement en situation de fatigue. Cette étude nous semble fondamentale pour la prévention des blessures par un entraînement spécifique des groupes musculaires défaillants. Cette démarche impliquera la mise d'un protocole spécifique de mesure de la force isométrique des différents groupes musculaires impliqués et la mise en place d'un entraînement adapté.

Applications pratiques

Les résultats des deux études présentées dans ce travail et réalisées dans le cadre d'une collaboration étroite entre le Laboratoire de Biomécanique et de Mécanique des Chocs de l'université Lyon 1 et la Fédération Française de Rugby permettent de proposer différentes applications pratiques dans le cadre de l'analyse de la performance en match, de l'optimisation des méthodes d'entraînements et de la détection des joueurs.

- Les résultats de notre première étude ont permis de définir les variables les plus pertinentes à mesurer dans le cadre de l'évaluation de la performance et de la fatigue en match en définissant notamment la mesure fine de l'accélération comme un des paramètres prioritaires. Ces résultats ont permis d'orienter les choix de développement technologiques avec notamment le parti pris de développer une système GPS équipé d'une centrale inertielle dont l'augmentation de la fréquence d'acquisition sera une priorité afin de pouvoir mesurer l'accélération avec précision et fiabilité.
- Notre deuxième étude suggère que dans les conditions de match l'activité isométrique répétée n'entraîne pas de fatigue métabolique intense justifiant une diminution significative du niveau d'activité. Cependant, Takarada (2003) montrent que les actions de plaquages et de rucks entraînent des lésions musculaires à l'origine d'un processus inflammatoire. Ainsi, les données sur les plaquages et les phases de combats qui pourraient générer une fatigue inflammatoire doivent être intégrées dans l'analyse des processus de fatigue. Cette approche complémentaire pourrait permettre d'optimiser les méthodes de récupération des joueurs en dissociant les joueurs dont la fatigue serait d'origine essentiellement métabolique (majoritairement les trois quarts) de ceux pour qui la fatigue aurait plutôt des origines d'ordre inflammatoire (plutôt les avants).
- Les conditions et l'enchaînement des accélérations sont différents en fonction des groupes de postes. Les avants réalisent la majorité des accélérations à partir d'un départ arrêté alors que les arrières réalisent plus d'accélérations à partir d'une course

à moyenne intensité. Ces différences impliquant des qualités physiologiques différentes devront être prises en compte dans les prescriptions d'entraînement, en proposant des exercices spécifiques en fonction du poste.

- L'analyse de la distribution des ratios va permettre de mettre en place des séances d'entraînements intermittents dont l'enchaînement des phases d'actions et de récupérations pourra être individualisé en fonction du groupe. Notre méthodologie d'analyse a ainsi permis de réajuster la distribution des courses réalisées à haute intensité et des activités de type statique, montrant que les courses à haute intensité représentent une proportion non négligeable des efforts, y compris pour les avants.
- L'étude concernant la répétition de tâche simulant la mêlée nous a permis de mettre en évidence le rôle important des ischios jambiers dans le maintien de la posture en mêlée. Des études complémentaires devraient nous permettre une meilleure compréhension de la coordination inter musculaire pour le maintien de la performance en mêlée. Cette analyse est primordiale dans l'objectif de limiter le risque de blessures et de produire un niveau de force optimal tant au niveau quantitatif que qualitatif.
- D'autre part, dans le cadre de la détection des potentiels et la sélection des joueurs pour les équipes de France, outre l'évaluation des dimensions anthropométriques et de l'aptitude aérobie, nous pourrions envisager de tester l'aptitude à accélérer ainsi que l'aptitude à répéter des accélérations et/ou des efforts isométriques intenses, ce qui nécessitera le développement d'un test spécifique.

Bibliographie

Abbiss CR, Laursen PB (2008) Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Med* 38:239–252.

Abt G, Lovell R (2009) The use of individualized speed and intensity thresholds for determining the distance run at high-intensity in professional soccer. *J Sports Sci* 27:893–898.

Ahlborg B, Bergström J, Ekelund LG, et coll. (1972) Muscle metabolism during isometric exercise performed at constant force. *J Appl Physiol* 33:224–228.

Arsac LM, Locatelli E (2002) Modeling the energetics of 100-m running by using speed curves of world champions. *J Appl Physiol* 92:1781–1788.

Arsac LM, Thiaudiere E, Diolez P, Gerville-Reache L (2004) Parameter estimation in modeling phosphocreatine recovery in human skeletal muscle. *Eur J Appl Physiol* 91:419–424.

Åstrand I, Åstrand PO, Christensen EH, Hedman R (1960) Intermittent muscular work. *Acta Physiol Scand* 48:448–453.

Aughey RJ (2011) Applications of GPS technologies to field sports. *Int J Sports Physiol Perform* 6:295–310.

Austin D, Gabbett T, Jenkins D (2011a) The physical demands of Super 14 rugby union. *J Sci Med Sport* 14:259–263.

Austin D, Gabbett T, Jenkins D (2011b) Repeated high-intensity exercise in professional rugby union. *J Sports Sci* 29:1105–1112.

Balsom PD, Gaitanos GC, Soderlund K, Ekblom B (1999) High-intensity exercise and muscle glycogen availability in humans. *Acta Physiol Scand* 165:337–345.

Balsom PD, Seger JY, Sjodin B, Ekblom B (1992a) Physiological responses to maximal

intensity intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol* 65:144–149.

Balsom PD, Seger JY, Sjodin B, Ekblom B (1992b) Maximal-intensity intermittent exercise: effect of recovery duration. *Int J Sports Med* 13:528–533.

Bigland-Ritchie, B., Furbush, F., & Woods, J. J. (1986). Fatigue of intermittent sub-maximal voluntary contractions: central and peripheral factors. *J Appl Physiol* 61(2) 421–429.

Bigland-Ritchie B, Lippold OC (1979) Changes in muscle activation during prolonged maximal voluntary contractions [proceedings]. *J Physiol (Lond)* 292:14P–15P.

Bigland-Ritchie B, Woods JJ (1984) Changes in muscle contractile properties and neural control during human muscular fatigue. *Muscle Nerve* 7:691–699.

Billaut F, Bishop D, Schaerz S (2011) Influence of Knowledge of Sprint Number on Pacing during Repeated-Sprint Exercise. *Med. Sci. Sports Exerc* 43(4) 665-72

Billaut F, Buchheit M (2013) Repeated-sprint performance and vastuslateralis oxygenation: Effect of limited O₂ availability. *Scand J Med Sci Sports* 23(3). e185-93

Billaut F, Smith K (2010) Prolonged repeated-sprint ability is related to arterial O₂ desaturation in men. *Int J Sports Physiol Perform* 5:197–209.

Bishop D, Edge J (2006) Determinants of repeated-sprint ability in females matched for single-sprint performance. *Eur J Appl Physiol* 97:373–379.

Bishop D, Edge J, Goodman C (2004) Muscle buffer capacity and aerobic fitness are associated with repeated-sprint ability in women. *Eur J Appl Physiol* 92:540–547.

Bishop D, Girard O, Mendez-Villanueva A (2011) Repeated-sprint ability - part II: recommendations for training. *Sports Med* 41:741–756.

Bishop D, Lawrence S, Spencer M (2003) Predictors of repeated-sprint ability in elite female hockey players. *J Sci Med Sport* 6:199–209.

Bishop D, Spencer M (2004) Determinants of repeated-sprint ability in well-trained team-sport athletes and endurance-trained athletes. *J Sports Med Phys Fitness* 44:1–7.

Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HK (1996a) Contribution of phospho-creatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *J Appl Physiol* 80:876–884.

Bogdanis GC, Nevill ME, Lakomy HK, Boobis LH (1998) Power output and muscle metabolism during and following recovery from 10 and 20 s of maximal sprint exercise in humans. *Acta Physiol Scand* 163:261–272.

Bogdanis GC, Nevill ME, Lakomy HK, et coll. (1996b) Effects of active recovery on power output during repeated maximal sprint cycling. *Eur J Appl Physiol* 74:461–469.

Bourdin M, Messonnier L, Hager JP, Lacour JR (2004) Peak power output predicts rowing ergometer performance in elite male rowers. *Int J Sports Med* 25:368–373.

Buchheit M (2012) Repeated-sprint performance in team sport players: associations with measures of aerobic fitness, metabolic control and locomotor function. *Int J Sports Med* 33:230–239.

Buchheit M, Abbiss CR, Peiffer JJ, Laursen PB (2011) Performance and physiological responses during a sprint interval training session: relationships with muscle oxygenation and pulmonary oxygen uptake kinetics. *Eur J Appl Physiol* 112:767–779.

Buchheit M, Bishop D, Haydar B, et coll. (2010) Physiological responses to shuttle repeated-sprint running. *Int J Sports Med* 31:402–409.

Buchheit M, Cormie P, Abbiss CR, et coll. (2009) Muscle deoxygenation during repeated sprint running: Effect of active vs. passive recovery. *Int J Sports Med* 30:418–425.

Buchheit M, Ufland P (2011) Effect of endurance training on performance and muscle reoxygenation rate during repeated-sprint running. *Eur J Appl Physiol* 111:293–301.

Cahill N, Lamb K, Worsfold P, et coll. (2012) The movement characteristics of English Premiership rugby union players. *J Sports Sci* 31:229–237.

Castagna C, Manzi V, D'Ottavio S, et coll. (2007) Relation between maximal aerobic power and the ability to repeat sprints in young basketball players. *J Strength Cond Res* 21:1172–1176.

Cerretelli P, Veicsteinas A, Fumagalli M, Dell'orto L (1976) Energetics of isometric exercise in man. *J Appl Physiol* 41:136–141.

Cettolo V, Ferrari M, Biasini V, Quaresima V (2007) Vastuslateralis O₂ desaturation in response to fast and short maximal contraction. *Med. Sci. Sports Exerc* 39:1949–1959.

Coughlan G, Green B, Pook P, et coll. (2011) Physical game demands in elite rugby union: a global positioning system analysis and possible implications for rehabilitation. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy* 41:600–605.

Coutts AJ, Duffield R (2010) Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports. *J Sci Med Sport* 13:133–135.

Crewther BT, Lowe T, Weatherby RP, et coll. (2009) Neuromuscular performance of elite rugby union players and relationships with salivary hormones. *J Strength Cond Res* 23:2046–2053.

Cunniffe B, Proctor W, Baker JS, Davies B (2009) An evaluation of the physiological demands of elite rugby union using Global Positioning System tracking software. *J Strength Cond Res* 23:1195–1203.

da Silva JF, Guglielmo LGA, Bishop D (2010) Relationship between different measures

of aerobic fitness and repeated-sprint ability in elite soccer players. *J Strength Cond Res* 24:2115–2121.

Dahlstedt, A. J., Katz, A., & Westerblad, H. (2001). Role of myoplasmic phosphate in contractile function of skeletal muscle: studies on creatine kinase-deficient mice. *J Physiol*, 533(Pt 2), 379–388.

Daussin FN, Zoll J, Dufour SP, et coll. (2008) Effect of interval versus continuous training on cardiorespiratory and mitochondrial functions: relationship to aerobic performance improvements in sedentary subjects. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 295:R264–72.

Davis J (1995) Direct determination of aerobic power. Champaign, IL : Human Kinetics, Illinois

Dawson B, Goodman C, Lawrence S, et coll. (1997) Muscle phosphocreatine repletion following single and repeated short sprint efforts. *Scand J Med Sci Sports* 7:206–213.

De Luca CJ (1997) The use of surface electromyography in biomechanics. *J Appl Biomech* 13:135–163.

Denis C & Lacour J.R (1998) Muscle normal. *Encyclopédie Médical*, 14-0006-A_10, Paris, Elsevier, 1-10.

Deutsch MU, Kearney GA, Rehrer NJ (2007) Time - motion analysis of professional rugby union players during match-play. *J Sports Sci* 25:461–472.

Deutsch MU, Maw GJ, Jenkins D, Reaburn P (1998) Heart rate, blood lactate and kinematic data of elite colts (under-19) rugby union players during competition. *J Sports Sci* 16:561–570.

di Prampero PE (2003) Factors limiting maximal performance in humans. *Eur J Appl Physiol* 90:420–429.

Di Salvo V, Collins A, McNeill B, Cardinale M (2006) Validation of Prozone; a new video-based performance analysis system. *Int J Perform Anal Sport* 6:108–119.

Dias da Silva SR, Goncalves M (2006) Dynamic and isometric protocols of knee extension: effect of fatigue on the EMG signal. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 46:35–42.

Docherty D (1988) Time-motion analysis related to the physiological demands of rugby. *J Hum Mov Studies* 14:269–277.

Duke, A. M., & Steele, D. S. (2001). Mechanisms of reduced SR Ca(2+) release induced by inorganic phosphate in rat skeletal muscle fibers. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 281(2), C418–29.

Dupont G, McCall A, Prieur F, et coll. (2010) Faster oxygen uptake kinetics during recovery is related to better repeated sprinting ability. *Eur J Appl Physiol* 110:627–634.

Dupont G, Millet GP, Guinhouya C, Berthoin S (2005) Relationship between oxygen uptake kinetics and performance in repeated running sprints. *Eur J Appl Physiol* 95:27–34.

Duthie G, Pyne D, Hooper S (2005) Time motion analysis of 2001 and 2002 super 12 rugby. *J Sports Sci* 23:523–530.

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

Duthie GM (2006) A framework for the physical development of elite rugby union players. *Int J Sports Physiol Perform* 1:2–13.

Eaton C, Keith G (2006) Position specific rehabilitation for rugby union players. Part I: Empirical movement analysis data. *Physical therapy in sport* 7:22–29.

Ebenbichler G, Kollmitzer J, Quittan M, Uhl F (1998) EMG fatigue patterns accompanying isometric fatiguing knee-extensions are different in mono-and bi-articular muscles. *Electroencephalogr Clinical Neurophysiol* 109 (1998) 256–262

Elder CP, Mahoney ET, Black CD, et coll. (2006) Oxygen cost of dynamic or isometric exercise relative to recruited muscle mass. *Dynamic Medicine* 5 (9)

Enoka RM, Stuart DG (1992) Neurobiology of muscle fatigue. *Journal of Applied Physiology* 72:1631–1648.

Essén B (1978) Studies on the regulation of metabolism in human skeletal muscle using intermittent exercise as an experimental model. *Acta Physiol Scand Suppl* 454:1–32.

Farina D, Merletti R, Enoka RM (2004) The extraction of neural strategies from the surface EMG. *J Appl Physiol* 96:1486–1495.

Fenn WO (1923) A quantitative comparison between the energy liberated and the work performed by the isolated sartorius muscle of the frog. *J Physiol (Lond)* 58:175–203.

Ferrari M, Mottola L, Quaresima V (2004) Principles, techniques, and limitations of near infrared spectroscopy. *Can J Appl Physiol* 29:463–487.

Fuglevand AJ, Zackowski KM, Huey KA, Enoka RM (1993) Impairment of neuromuscular propagation during human fatiguing contractions at submaximal forces. *J Physiol (Lond)* 460:549–572.

Fuller CW, Taylor AE, Brooks JHM, Kemp SPT (2013) Changes in the stature, body mass and age of English professional rugby players: A 10-year review. *J Sports Sci* 31(7) 795-802.

Gaitanos GC, Williams C, Boobis LH, Brooks S (1993) Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. *J Appl Physiol* 75:712–719.

Garland SJ (1991) Role of small diameter afferents in reflex inhibition during human muscle fatigue. *J Physiol (Lond)* 435:547–558.

Garland SJ, McComas AJ (1990) Reflex inhibition of human soleus muscle during fatigue. *J Physiol (Lond)* 429:17–27.

Girard O, Mendez-Villanueva A, Bishop D (2011) Repeated-sprint ability - part I: factors contributing to fatigue. *Sports Med* 41:673–694.

Glaister M (2005) Multiple sprint work : physiological responses, mechanisms of fatigue and the influence of aerobic fitness. *Sports Med* 35:757–777.

Glaister M, Stone MH, Stewart AM, et coll. (2006) Aerobic and anaerobic correlates of multiple sprint cycling performance. *J Strength Cond Res* 20:792–798.

Grassi B (2000) Skeletal muscle VO₂ on-kinetics: set by O₂ delivery or by O₂ utilization? New insights into an old issue. *Med. Sci. Sports Exerc* 32:108–116.

Hamaoka T, Iwane H, Shimomitsu T, et coll. (1996) Noninvasive measures of oxidative metabolism on working human muscles by near-infrared spectroscopy. *J Appl Physiol* 81:1410–1417.

Hamaoka T, Katsumura T, Murase N, et coll. (2003) Muscle oxygen consumption at onset of exercise by near infrared spectroscopy in humans. *Adv Exp Med Biol* 530:475–483.

Hamilton AL, Nevill ME, Brooks S, Williams C (1991) Physiological responses to maximal intermittent exercise: differences between endurance-trained runners and games players. *J Sports Sci* 9:371–382.

Harris RC, Edwards RH, Hultman E, et coll. (1976) The time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. *Pflugers Arch* 367:137–142.

Haseler LJ, Hogan MC, Richardson RS (1999) Skeletal muscle phosphocreatine recovery in exercise-trained humans is dependent on O₂ availability. *J Appl Physiol* 86:2013–2018.

Haseler LJ, Lin A, Hoff J, Richardson RS (2007) Oxygen availability and PCr recovery rate in untrained human calf muscle: evidence of metabolic limitation in normoxia. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 293:R2046–51.

Hautier CA, Arsac LM, Deghdegh K, et coll. (2000) Influence of fatigue on EMG/force ratio and cocontraction in cycling. *Med. Sci. Sports Exerc* 32:839–843.

Hautier CA, Belli A, Lacour JR (1998) A method for assessing muscle fatigue during sprint exercise in humans using a friction-loaded cycle ergometer. *Eur J Appl Physiol* 78:231–235.

Higham DG, Pyne DB, Mitchell JA (2013) Rugby Union Players. In: Tanner RK, Gore CJ (eds) *Physiological Tests in Elite Athletes*, 2nd ed. Australian Institute of Sport, 379–396

Hirvonen J, Rehunen S, Rusko H, Härkönen M (1987) Breakdown of high-energy phosphate compounds and lactate accumulation during short supramaximal exercise. *Eur J Appl Physiol* 56:253–259.

Holway FE, Garavaglia R (2009) Kinanthropometry of Group I rugby players in Buenos Aires, Argentina. *J Sports Sci* 27:1211–1220.

Hughes M, Evans E, Wells J (2001) Establishing normative profiles in performance analysis. *Int J Perform Anal Sport* 1:1–26.

Inbar O, Oren A, Scheinowitz M, et coll. (1994) Normal cardiopulmonary responses during incremental exercise in 20- to 70-yr-old men. *Med. Sci. Sports Exerc* 26:538–546.

James DVB, Sandals LE, Wood DM, Jones AM (2006) Chapter 11 : Pulmonary gas exchange. In: Winter EM, Jones AM, Davison RCR, et coll. (eds) Sport and Exercise Physiology Testing Guidelines: Volume II - Exercise and Clinical Testing: The British Association of Sport and Exercise Sciences Guide (Bases Sport and Exercise Science). Routledge, 101–111

Johnson MA, Polgar J, Weightman D, Appleton D (1973) Data on the distribution of fibre types in thirty-six human muscles. An autopsy study. *J Neurol Sci* 18:111–129.

Johnston RJ, Watsford ML, Pine MJ, et coll. (2012) The Validity and Reliability of 5-hZ Global Positioning System Units to Measure Team Sport Movement Demands. *J Strength Cond Res* 26:758–765.

Jougla, A., Micallef, J. P., & Mottet, D. (2010). Effects of active vs. passive recovery on repeated rugby-specific exercises. *J Sci Med Sport* 13(3) 350–355.

Juel C (1988) Muscle action potential propagation velocity changes during activity. *Muscle Nerve* 11:714–719.

Juel C (1998) Muscle pH regulation: role of training. *Acta Physiol Scand* 162:359–366.

Karlsson J, Funderburk CF (1975) Constituents of human muscle in isometric fatigue. *J Appl Physiol* 38(2):208-211

Kime R, Hamaoka T, Sako T, et coll. (2003) Delayed reoxygenation after maximal isometric handgrip exercise in high oxidative capacity muscle. *Eur J Appl Physiol* 89:34–41.

Kimura N, Hamaoka T, Kurosawa Y, Katsumura T (2006) Contribution of intramuscular oxidative metabolism to total ATP production during forearm isometric exercise at varying intensities. *Tohoku J Exp Med* 208:307–320.

Kindig CA, Richardson TE, Poole DC (2002) Skeletal muscle capillary hemodynamics from rest to contractions: implications for oxygen transfer. *J Appl Physiol* 92:2513–2520.

Lago C, Casais L, Dominguez E (2010) The effects of situational variables on distance covered at various speeds in elite soccer. *European journal of Sport Science* 10:103–109.

Larsson P (2003) Global positioning system and sport-specific testing. *Sports Med* 33:1093–1101.

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

Lovell R, Abt G (2012) Individualisation of Time-Motion Analysis: A case cohort Example. *Int J Sports Physiol Perform* 8(4) 456-458

Maas S, Kok ML, Westra HG, Kemper HC (1989) The validity of the use of heart rate in estimating oxygen consumption in static and in combined static/dynamic exercise. *Ergonomics* 32:141–148.

Margaria R, Oliva RD, di Prampero PE, Cerretelli P (1969) Energy utilization in intermittent exercise of supramaximal intensity. *J Appl Physiol* 26:752–756.

McCully KK, Kakihiro H, Vandeborne K, Kent-Braun J (1991) Noninvasive measurements of activity-induced changes in muscle metabolism. *J Biomech* 24 Suppl 1:153–161.

McLean DA (1992) Analysis of the physical demands of international rugby union. *J Sports Sci* 10:285–296.

McMahon S, Jenkins D (2002) Factors affecting the rate of phosphocreatine resynthesis following intense exercise. *Sports Med* 32:761–784.

Mendez-Villanueva A, Edge J, Suriano R, et coll. (2012) The Recovery of Repeated-Sprint Exercise Is Associated with PCr Resynthesis, while Muscle pH and EMG Amplitude Remain Depressed. *PLoS ONE* 7:e51977.

Mendez-Villanueva A, Hamer P (2007) Fatigue responses during repeated sprints matched for initial mechanical output. *Med. Sci. Sports Exerc* 39(12):2219-25.

Mendez-Villanueva A, Hamer P (2008) Fatigue in repeated-sprint exercise is related to muscle power factors and reduced neuromuscular activity. *Eur J Appl Physiol* 103:411–419.

Meyer RA, Sweeney HL, Kushmerick MJ (1984) A simple analysis of the "phospho-creatine shuttle". *Am J Physiol* 246:C365-77.

Milburn PD (1993) Biomechanics of rugby union scrummaging. Technical and safety issues. *Sports Med* 16:168–179.

Milburn PD (1990) The kinetics of rugby union scrummaging. *J Sports Sci* 8:47–60.

Morton AR (1978) Applying physiological principles to rugby training. *Sports Coach* 2:4–9.

Osgnach C, Poser S, Bernardini R, et coll. (2010) Energy cost and metabolic power in elite soccer: a new match analysis approach. *Med. Sci. Sports Exerc* 42:170–178.

Parolin ML, Chesley A, Matsos MP, et coll. (1999) Regulation of skeletal muscle glycogen phosphorylase and PDH during maximal intermittent exercise. *Am J Physiol* 277:E890–900.

Patterson RP, Pearson J, Fisher SV (1985) Work-rest periods: their effects on normal physiologic response to isometric and dynamic work. *Arch Phys Med Rehabil* 66:348–352.

Pereira MIR, Gomes PSC, Bhambhani YN (2009) Acute effects of sustained isometric knee extension on cerebral and muscle oxygenation responses. *Clin Physiol Funct Imaging* 29:300–308.

Perrey S, Racinais S, Saimouaa K, Girard O (2010) Neural and muscular adjustments following repeated running sprints. *Eur J Appl Physiol* 109:1027–1036.

Péronnet F, Thibault G (1989) Mathematical analysis of running performance and world running records. *J Appl Physiol* 67:453–465.

Place N, Bruton JD, Westerblad H (2009) Mechanisms of fatigue induced by isometric contractions in exercising humans and in mouse isolated single muscle fibres. *Clin Exp Pharmacol Physiol* 36:334–339.

Preatoni E, Stokes KA, England ME, Trewartha G (2013) The influence of playing level on the biomechanical demands experienced by rugby union forwards during machine scrummaging. *Scand J Med Sci Sports*. 23(3) e178-84

Quaresima V, Crisostomi S, Mottola L, et coll. (2006) Vastuslateralis metabolic response to explosive maximal isometric leg press exercise. *Adv Exp Med Biol* 578:167–171.

Quarrie KL, Handcock P, Toomey MJ, Waller AE (1996) The New Zealand rugby injury and performance project. IV. Anthropometric and physical performance comparisons between positional categories of senior A rugby players. *Br J Sports Med* 30:53–56.

Quarrie KL, Hopkins WG, Anthony MJ, Gill ND (2012) Positional demands of international rugby union: Evaluation of player actions and movements. *J Sci Med Sport* 16(4) 353-359

Quarrie KL, Wilson BD (2000) Force production in the rugby union scrum. *J Sports Sci* 18:237–246.

Racinais S, Bishop D, Denis R, et coll. (2007) Muscle deoxygenation and neural drive to the muscle during repeated sprint cycling. *Med. Sci. Sports Exerc* 39:268–274.

Rampinini E, Sassi A, Morelli A, et coll. (2009) Repeated-sprint ability in professional and amateur soccer players. *Appl Physiol Nutr Metab* 34:1048–1054.

Reilly T, Thomas V (1976) A motion analysis of work-rate in different positional roles in professional football match-play. *J Hum Mov Studies* 2:87–97.

Roberts SP, Trewartha G, Higgitt RJ, et coll. (2008) The physical demands of elite English rugby union. *J Sports Sci* 26:825–833.

Rotto DM, Kaufman MP (1988) Effect of metabolic products of muscular contraction on discharge of group III and IV afferents. *Journal of Applied Physiology* 64:2306–2313.

Rybicki KJ, Waldrop TG, Kaufman MP (1985) Increasing gracilis muscle interstitial potassium concentrations stimulate group III and IV afferents. *Journal of Applied Physiology* 58:936–941.

Ryschon TW, Fowler MD, Wysong RE, et coll. (1997) Efficiency of human skeletal muscle in vivo: comparison of isometric, concentric, and eccentric muscle action. *J Appl Physiol* 83:867–874.

Sadamoto T, Bonde-Petersen F, Suzuki Y (1983) Skeletal muscle tension, flow, pressure, and EMG during sustained isometric contractions in humans. *Eur J Appl Physiol* 51:395–408.

Saltin B, Essén B, Pedersen BK (1976) Intermittent exercise: its physiology and some practical applications. 23–51.

Saugen, E., Vøllestad, N. K., Gibson, H., Martin, P. A., & Edwards, R. H. (1997). Dissociation between metabolic and contractile responses during intermittent isometric exercise in man. *Exp physiol* 82(1) 213–226.

Sedeaud A, Marc A, Schipman J, et coll. (2012) How they won Rugby World Cup through height, mass and collective experience. *Br J Sports Med* 46(8) 580-584.

Sinoway L, Prophet S, Gorman I, et coll. (1989) Muscle acidosis during static exercise is associated with calf vasoconstriction. *Journal of Applied Physiology* 66:429–436.

Sjøgaard G, Savard G, Juel C (1988) Muscle blood flow during isometric activity and its relation to muscle fatigue. *Eur J Appl Physiol* 57:327–335.

Smith KJ, Billaut F (2010) Influence of cerebral and muscle oxygenation on repeated-sprint ability. *Eur J Appl Physiol* 109:989–999.

Sparks M, Coetzee B (2013) The use of heart rates and graded maximal test values to determine rugby union game intensities. *J Strength Cond Res* 27:507–513.

Spencer M, Bishop D, Dawson B (2006) Metabolism and performance in repeated cycle sprints: active versus passive recovery. *Med. Sci. Sports Exerc* 38:1492–1499.

Spencer M, Bishop D, Dawson B, Goodman C (2005) Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities: specific to field-based team sports. *Sports Med* 35:1025–1044.

Spencer M, Dawson B, Goodman C, et coll. (2008) Performance and metabolism in repeated sprint exercise: effect of recovery intensity. *Eur J Appl Physiol* 103:545–552.

Takahashi H, Inaki M, Fujimoto K, et coll. (1995) Control of the rate of phosphocreatine resynthesis after exercise in trained and untrained human quadriceps muscles. *Eur J Appl Physiol* 71:396–404.

Takarada, Y. (2003). Evaluation of muscle damage after a rugby match with special reference to tackle plays. *Br J Sports Med* 37(5) 416–419.

Tomlin DL, Wenger HA (2002) The relationships between aerobic fitness, power maintenance and oxygen consumption during intense intermittent exercise. *J Sci Med Sport* 5:194–203.

Varley MC, Elias GP, Aughey RJ (2012) Current match-analysis techniques' underestimation of intense periods of high-velocity running. *Int J Sports Physiol Perform* 7 (2):183-185

Varley MC, Fairweather IH, Aughey RJ (2012) Validity and reliability of GPS for measuring instantaneous velocity during acceleration, deceleration, and constant motion. *J Sports Sci* 30:121–127.

Victor RG, Bertocci LA, Pryor SL, Nunnally RL (1988) Sympathetic nerve discharge is coupled to muscle cell pH during exercise in humans. *J Clin Invest* 82:1301–1305.

Vigne G, Gaudino C, Rogowski I, et coll. (2010) Activity profile in elite Italian soccer team. *Int J Sports Med* 31:304–310.

Vøllestad, N. K., Sejersted, O. M., Bahr, R., Woods, J. J., & Bigland-Ritchie, B. (1988). Motor drive and metabolic responses during repeated submaximal contractions in humans. *J Appl Physiol* 64(4) 1421–1427.

Wadley G, Le Rossignol P (1998) The relationship between repeated sprint ability and the aerobic and anaerobic energy systems. *J Sci Med Sport* 1:100–110.

Wagner PD (2000) Diffusive resistance to O₂ transport in muscle. *Acta Physiol Scand* 168:609–614.

Wallimann T, Tokarska-Schlattner M, & Schlattner U. (2011) The creatine kinase system and pleiotropic effects of creatine. *Amino Acids* 40(5) 1271-1296

Warrington G, Ryan C, Murray F, et coll. (2001) Physiological and metabolic characteristics of elite tug of war athletes. *Br J Sports Med* 35:396–401.

Westerblad, H., & Allen, D. G. (1991). Changes of myoplasmic calcium concentration during fatigue in single mouse muscle fibers. *The Journal of general physiology*, 98(3),

615–635.

Westerblad, H., Bruton, J. D., & Lannergren, J. (1997). The effect of intracellular pH on contractile function of intact, single fibres of mouse muscle declines with increasing temperature. *J Physiol*, 500 (*Pt 1*), 193–204.

Winterbottom W (1952) Soccer Coaching, London: Naldrett Press.

Wu W-L, Chang J-J, Wu J-H, Guo L-Y (2007) An investigation of rugby scrimmaging posture and individual maximum pushing force. *J Strength Cond Res* 21:251–258.

Yanagiya T, Kanehisa H, Kouzaki M, et coll. (2003) Effect of gender on mechanical power output during repeated bouts of maximal running in trained teenagers. *Int J Sports Med* 24:304–310.

Yang Y, Soyemi OO, Landry MR, Soller BR (2005) Influence of a fat layer on the near infrared spectra of human muscle: quantitative analysis based on two-layered Monte Carlo simulations and phantom experiments. *Opt Express* 13:1570-1579

Young W, McLean B, Ardagna J (1995) Relationship between strength qualities and sprinting performance. *J Sports Med Phys Fitness* 35:13–19.

Zubillaga A (2006) La actividad del jugador de futbol en altacompeticion: Analisis de variabilidad. Thèse. Université de Malaga.

Annexes

Annexe 1 :

Lacome M, Piscione J, Hager JP, Bourdin M.

A new approach to quantifying physical demand in rugby union.

Journal of Sports Sciences (2013).

<http://dx.doi.org/10.1080/02640414.2013.823225>

This article was downloaded by: [Muriel Bourdin]

On: 10 September 2013, At: 04:53

Publisher: Routledge

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



Journal of Sports Sciences

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/rjsp20>

A new approach to quantifying physical demand in rugby union

Mathieu Lacomme^{a b}, Julien Piscione^a, Jean-Philippe Hager^a & Muriel Bourdin^b

^a Research Department, French Rugby Union Federation (FFR), Marcoussis, France

^b LBMC, IFSTTAR, University of Lyon 1, Oullins, France

Published online: 09 Sep 2013.

To cite this article: Journal of Sports Sciences (2013): A new approach to quantifying physical demand in rugby union, Journal of Sports Sciences, DOI: 10.1080/02640414.2013.823225

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/02640414.2013.823225>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

A new approach to quantifying physical demand in rugby union

MATHIEU LACOME^{1,2}, JULIEN PISCIONE¹, JEAN-PHILIPPE HAGER¹,
& MURIEL BOURDIN²

¹Research Department, French Rugby Union Federation (FFR), Marcoussis, France, and ²LBMC, IFSTTAR, University of Lyon 1, Oullins, France

(Accepted 3 July 2013)

Abstract

The objective of the study was to describe an original approach to assessing individual workload during international rugby union competitions. The difference between positional groups and between the two halves was explored. Sixty-seven files from 30 French international rugby union players were assessed on a computerised player-tracking system (Amisco Pro[®], Sport Universal Process, Nice, France) during five international games. Each player's action was split up into exercise and recovery periods according to his individual velocity threshold. Exercise-to-recovery (E:R) period ratios and acceleration were calculated. Results indicated that about 65% of exercise periods lasted less than 4 s; half of the E:Rs were less than 1:4, and about one-third ranged between 1 and 1:4 and about 40% of exercise periods were classified as medium intensity. Most acceleration values were less than $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ and started from standing or walking activity. Back row players showed the highest mean acceleration values over the game ($P < 0.05$). No significant decrease in physical performance was seen between the first and second halves of the games except for back rows, who showed a significant decrease in mean acceleration ($P < 0.05$). The analysis of results emphasised the specific activity of back rows and tended to suggest that the players' combinations of action and recovery times were optimal for preventing large decrease in the physical performance.

Keywords: Time-motion analysis, Rugby, Acceleration, Ratio

Introduction

In recent years, video graphic motion analysis has become a common method of estimating the physical demands of rugby union, as in soccer. The player's displacement can be analysed using two methods, depending on the video system used. (1) The notational method defines subjective intensity zones assessed from the observation of each player's movement characteristics (Austin, Gabbett, & Jenkins, 2011a; Austin, Jenkins, & Gabbett, 2011b; Deutsch, Kearney, & Rehrer, 2007; Duthie, Pyne, & Hooper, 2005). (2) Alternative time-motion techniques are now available that use automatic and semi-automatic (Eaton & George, 2006; Quarrie, Hopkins, Anthony, & Gill, 2013) or manual (Roberts, Trewartha, Higgitt, El-Abd, & Stokes, 2008) player-tracking techniques to provide velocity data over the course of a match; intensity zones can thus be defined using absolute velocity values. Both approaches have limitations. First, the choice of a single absolute velocity threshold for all players does not take into account the player's individual physiological characteristic despite the noticeable

heterogeneity of physiological profiles between positional groups (e.g. Duthie, Pyne, & Hooper, 2003). Abt and Lovell (2009) highlighted the importance of individualising the high-intensity threshold: the distance covered at high intensity by a professional soccer player was substantially underestimated if the same absolute running velocity value was used for all players. Second, the usual method of data analysis consists in determining the frequency and duration of activity in different intensity zones. However, as illustrated by Figure 1 and pointed out by Cunniffe, Proctor, Baker, and Davies (2009), this analysis provides frequency of entry per velocity zone but not the number of real exercise bouts. Since velocity almost never reached a steady state, exercise bouts could be counted twice due to acceleration and deceleration phases. Likewise, each individual activity was analysed in terms of duration per velocity zone, but never analysed globally as such.

Moreover, neither approach accounts for the fact that the metabolic cost of running at a constant velocity is significantly lower than the cost of acceleration (di Prampero et al., 2005; Osgnach, Poser, Bernardini, Rinaldo, & di Prampero, 2010).

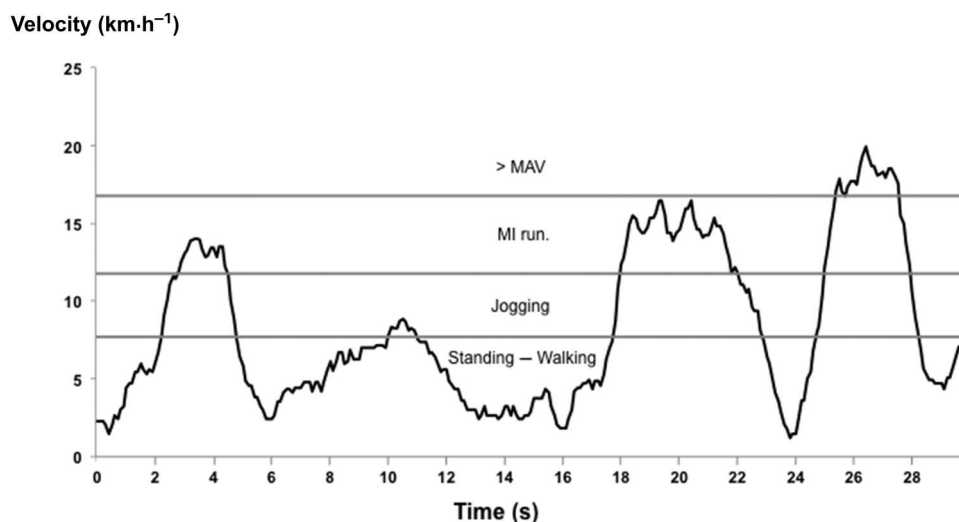


Figure 1. Typical evolution of the velocity ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) observed during a game. Each horizontal line indicates a different intensity threshold (MAV: maximal aerobic velocity; MI run.: medium-intensity run).

Osgnach et al. (2010) also demonstrated that the energy cost of acceleration increased as a function of running velocity. To the best of our knowledge, only one previous study has considered acceleration in the analysis of a rugby game, but only 2 players were analysed (Cunniffe et al., 2009). The analysis of acceleration data will arguably improve the understanding of physical demand during rugby match play.

The intermittent nature of rugby play was demonstrated by McLean (1992), who first calculated the ratio between exercise and recovery period durations (E:R) to quantify exercise density during the Five Nations matches in 1991. Subsequently, mean E:R duration was analysed in each positional group to theorise physiological demand (Deutsch et al., 2007) and training prescription (Eaton & George, 2006). However, for a given E:R, physiological workload depends on exercise duration (Åstrand, Åstrand, Christensen, & Hedman, 1960; Balsom, Seger, Sjodin, & Ekblom, 1992) and, for a given ratio and exercise duration, on the intensity of exercise and recovery periods (Åstrand et al., 1960; Bogdanis, Nevill, Lakomy, Graham, & Louis, 1996; Spencer, Bishop, & Dawson, 2006; Spencer, Dawson, Goodman, Dascombe, & Bishop, 2008).

The primary aim of the present study was to propose a complementary approach to classic time-motion analysis during international rugby competitions by analysing the mean intensity of each player's activity, acceleration and E:R distribution according to exercise duration and intensity in different positional groups.

A secondary aim was to investigate decrease in physical performance during the course of a match.

Methods

Participants

The experiment was carried out on 30 French international rugby players. To make inter-position comparisons, players were categorised as forwards or backs, and subdivided into 4 positional groups following Deutsch, Maw, Jenkins, and Reaburn (1998): Front row forwards (props and second rows, $n = 9$); back row forwards (hookers and back rows, $n = 8$); inside backs (outside halves and centre, $n = 6$) and outside backs (wingers and full-backs, $n = 7$). Scrum-halves ($n = 2$) were excluded from the analysis due to the limited sample and unique physical demands of that position (Deutsch et al., 1998; Duthie et al., 2005; Roberts et al., 2008). The results of annual physiological testing were used in agreement with the *Fédération Française de Rugby* (FFR, French Rugby Federation). Match recordings were bought by the FFR, which consented to the use of the data. The study was conducted in accordance with the guidelines of the ethics committee of the University of Lyon (France). Anthropometric characteristics of the players are listed in Table I.

Procedures

Physiological tests were conducted in November, in a single training session.

Five home matches were then analysed a posteriori. As can be seen in Table II, games 1 and 2 were international competitions played in November while games 3–5 were video-recorded during the 2010 Six Nations Tournament in February and March. Players participating in at least 1 complete half were included in the analysis which represented

Table I. Anthropometric and physiological characteristics of the 4 positional groups.

Positional group (<i>n</i>)	Forwards			Backs		
	Front row (9)	Back row (8)	All forwards (17)	Inside backs (6)	Outside backs (7)	All backs (13)
Age (years)	29.9 ± 3.3	27.4 ± 4.1	28.7 ± 3.8	25.9 ± 3.5	27.7 ± 3.4	27.1 ± 3.4
Height (m)	1.88 ± 0.09	1.88 ± 0.05	1.88 ± 0.07	1.82 ± 0.05	1.83 ± 0.06	1.83 ± 0.05
Mass (kg)	112.4 ± 6.7	103.7 ± 7.5 ^a	108.3 ± 8.2	93.0 ± 14.6 ^a	90.9 ± 6.4 ^{abc}	94.0 ± 8.2 [*]
Body fat (%)	17.5 ± 5.8	13.3 ± 4.7	15.5 ± 5.5	15.3 ± 5.8	11.4 ± 1.8	13.5 ± 4.8
MAV (km·h ⁻¹)	14.9 ± 0.5	16.1 ± 1.3	15.5 ± 0.8	15.4 ± 0.8	15.7 ± 0.9	15.4 ± 1.1
VLa4 (km·h ⁻¹)	12.2 ± 0.9	12.5 ± 1.4	12.3 ± 1.1	12.3 ± 0.8	13.2 ± 1.1	12.7 ± 0.9
VLa4 (% MAV)	82.0 ± 5.6	77.5 ± 4.9 ^d	79.9 ± 5.7	80.0 ± 3.6	83.5 ± 5.1	81.9 ± 4.7

Notes: ^aSignificantly different to front row forwards, $P < 0.05$; ^bSignificantly different to back row forwards, $P < 0.05$; ^cSignificantly different to inside backs, $P < 0.05$; ^dSignificantly different to outside backs, $P < 0.05$. *Significant between group (forwards and backs) differences, $P < 0.05$. MAV: maximal aerobic velocity; VLa4: velocity corresponding to blood lactate concentration of 4 mmol·l⁻¹.

Data are presented as mean ± standard deviation; (*n*) number of players.

Table II. Result, real playing time and number of files analysed for each of the 5 matches.

Game	Result	Real playing time (min)	Number of files analysed				Total files
			Forwards		Backs		
			Front row	Back row	Inside backs	Outside backs	
1	Won 20–13	38.7	4	4	2	3	13
2	Lost 12–39	36.8	4	4	3	3	14
3	Won 33–10	44.5	4	4	3	3	14
4	Won 46–20	37.7	4	4	3	2	13
5	Won 12–10	44.8	4	4	3	2	13
	Total files		20	20	14	13	67

67 files. The results, real playing time and number of files analysed are listed in Table II.

Analysis and calculations

Physiological assessment. Velocity corresponding to a blood lactate concentration ([La]b) of 4 mmol·l⁻¹ (VLa4) and maximal aerobic velocity were determined using an intermittent progressive running test (adapted from the test described by Leger and Boucher [1980]) consisting of bouts of 3 min interspersed with 1 min passive rest. Velocity was increased by 2 km·h⁻¹ from 8 to 12 km·h⁻¹ and then by 1 km·h⁻¹ until voluntary exhaustion. The test was performed on a Tartan outdoor track. Players were all fully familiarised with the test procedure. During the test, heart rate was continuously recorded using a heart-rate monitor (Polar Team2, Kempele, Finland). Blood was sampled from the fingertip, during each rest period and 3 min after end of test. [La]b was measured using a lactate analyser (YSI2300, YSI Inc., Yellow Springs, OH, USA). VLa4 was determined by straight-line interpolation between the two closest measured lactate values. Body fat was assessed on whole-body dual-energy X-ray absorptiometry

(D-XA) (Discovery W, Hologic Inc., Marlborough, MA, USA).

Video data collection and analysis. A computerised player-tracking system (Amisco Pro[®], Sport Universal Process, Nice, France) was used to record the activity of each player during the game. Six to eight cameras were positioned under the roof of the Stade de France stadium (Saint Denis, France) and subsequently calibrated and synchronised. The signals and angles obtained by the encoders were sequentially converted into digital data at 25 Hz and recorded on 6 computers for post-game analysis. Processing of the raw data gave the distance covered every 0.1 s (10 Hz).

In line with Vigne, Gaudino, Rogowski, Alloatti, and Hautier (2010), displacement at velocities higher than VLa4 and static activity were considered as exercise, and activity lower than VLa4 as recovery. For each period of exercise corresponding to running, mean exercise velocity was calculated and subdivided into medium-intensity running velocity (medium-intensity run, ranging between VLa4 and maximal aerobic velocity) and supramaximal running velocity (higher than maximal aerobic velocity).

Total distance, duration and mean intensity in the various previously defined intensity zones were determined automatically on computerised match analysis software (Amisco Viewer[®], Sport Universal Process, Nice, France). The study of Zubillaga (2006) compared the distances and velocities obtained with the Amisco Pro[®] system to that calculated from time performances over known distances. It was concluded by the author that the Amisco Pro[®] system demonstrated high level of accuracy and reliability.

Scrum, rucks and mauls were classified as “static activity”. Since the system used was unable to identify and quantify static activities accurately and automatically, active participation in a ruck or maul was monitored manually from the moment a player’s shoulder entered into contact with the ruck or maul to the moment it broke contact. Tackles whereby the ball carrier was stopped on their feet were also classified as “static activity”. Scrum, rucks and mauls were identified from match videos and listed by an experienced operator. The reliability of a similar time–motion analysis method has previously been documented (Deutsch et al., 1998, 2007). The time spent and distance travelled during static activities was excluded from the analysis done automatically by Amisco Viewer[®].

In order to establish a representative profile for each positional group, all 5 games were pooled for analysis (Hughes, Evans, & Wells, 2001).

Calculations. For each player data file, E:R was calculated by dividing exercise period duration by the following recovery duration. The results were related to the total number of E:R ratios (i.e. exercise + recovery events) and expressed in percentages (%). Ratios were divided into 3 groups: lower than 1:4 (E:R < 1:4), ranging between 1:4 and 1 (1:4 < E:R < 1) and higher than 1 (E:R > 1) and expressed as percentages (%) of the total number of ratios. For each group, E:Rs were classified according to exercise duration and exercise intensity.

Acceleration values were calculated from distance data sampled at 10 Hz and derived twice. A Butterworth low-pass second-order (cut-off frequency: 1 Hz) double phase-lag filter was used after each derivation. According to the manufacturer, the mean error for a pixel was 75 mm (ranging between 50 and 100 mm according to the position of the player relative to the cameras). To test the accuracy and the reliability of our calculation, we generate 30 s noisy displacement data sets (sampled at 10 Hz) using the Monte Carlo method and considering a standard deviation of 75 mm. We calculated the standard deviation of the noisy data sets to assess the accuracy and the reliability of the calculation of

both velocity and acceleration values and to verify the convergence of the standard deviation computed from these noisy sets regarding the number of sets (between 10 and 500 30 s noisy sets). Standard deviation was assessed 0.17 m·s⁻¹ and 0.34 m·s⁻² for velocity and acceleration, respectively, whatever the number of noisy sets.

Only acceleration values reaching at least 1 m·s⁻² for a duration greater than 0.5 s were taken into account in the analysis. In accordance with Osgnach et al. (2010), data were pooled in 3 groups: 1–2, 2–3 and greater than 3 m·s⁻². Acceleration values were then classified into the following activity categories according to mean exercise-period velocity: standing–walking (0–7 km·h⁻¹), jogging (7 km·h⁻¹ – VLa4), medium-intensity run and higher than maximal aerobic velocity.

To analyse changes in activity patterns over the whole match, only players participating in a complete match were analysed. This represented 37 files (front rows, 9 files; back rows, 10 files; inside backs, 9 files and outside backs, 9 files). The study parameters were averaged per match and per half.

Statistical analysis

All data are presented as mean ± standard deviation. The study parameters studied were not normally distributed on the Shapiro–Wilk test, and non-parametric tests were therefore used. Differences between groups and between the first and second halves of the matches were tested using the Wilcoxon test. Statistical significance was set at $P < 0.05$. All statistics were run on JMP Pro 9 (SAS, Cary, NC, USA).

Results

Anthropometric and physiological characteristics of the 4 positional groups

The results demonstrated that players in the 4 positional groups had similar heights. On the other hand, body mass was greater in forwards than in backs. Front rows were the heaviest and outside backs the lightest. There was no significant difference between positional groups relative to body fat, VLa4, maximal aerobic velocity or age. VLa4 related to the maximal aerobic velocity (VLa4%) was significantly lower in back rows than in outside backs ($P < 0.05$).

Total exercise time and distance covered

Front rows and back rows showed similar mean total exercise times (11.9 ± 1.3 and 11.2 ± 2.6 min, respectively). Inside backs showed a mean total exercise time of 10 ± 1.4 min, similar to back rows,

shorter than front rows ($P < 0.05$) and longer than outside backs (7.1 ± 1.3 min, $P < 0.05$).

Backs covered more distance than forwards ($7,944 \pm 659$ vs $7,006 \pm 356$ m, respectively; $P < 0.05$). Inside backs and outside backs covered similar distances. Front rows covered the shortest distance ($6,935 \pm 334$). Back rows and outside backs covered similar distances ($7,215 \pm 266$ and $7,764 \pm 789$, respectively), back rows covered shorter distance than inside backs ($8,079 \pm 539$; $P < 0.05$);

Exercise recovery ratio

The total number of ratios (exercise + recovery events) per match was significantly lower in backs than in forwards (137.1 ± 28.8 vs 178.7 ± 25.7 , respectively; $P < 0.05$). The total number of ratios in front rows was similar to that in back rows (185.9 ± 20.3 and 172.2 ± 29.3 , respectively) and significantly higher in inside backs than in outside backs (155.4 ± 13.9 and 118 ± 16.1 respectively, $P < 0.05$). Inside backs showed a lower total number of ratios than front rows ($P < 0.05$); outside backs also showed a lower total number of ratios than back rows ($P < 0.05$).

To facilitate the reading of Table III, data higher than 5% are coloured in grey. Overall, as illustrated in Table III and synthesised in Table IV, forwards were more involved in static activity and backs were more involved in supramaximal intensity bouts. No significant difference was found for medium-intensity runs. All positional groups had similar percentages of E:Rs in per exercise duration category.

Back rows had significantly more E:R >1 ratios than front rows or outside backs; outside backs had the lowest percentage. Outside backs had significantly more E:R $<1:4$ ratios than front rows, back rows or inside backs.

It can be seen that, for exercise durations less than 4 s, whatever the type of exercise, a large part of the action showed a E:R $<1:4$. For exercise durations >4 s and in static activity, forwards showed a preponderance of E:R <1 . For exercise intensities greater than maximal aerobic velocity, backs showed a large percentage of exercise durations >4 s, regardless of the ratio. In the medium-intensity run category, forwards showed a lower percentage of E:R $<1:4$ than backs for exercise durations 2–4 s.

Acceleration

Mean acceleration duration was significantly higher in backs than in forwards (0.85 ± 0.06 vs

0.76 ± 0.03 s, respectively; $P < 0.05$), as was mean maximal acceleration duration (3.67 ± 0.35 vs 3.24 ± 0.39 s, respectively; $P < 0.05$).

Mean acceleration value was significantly higher in forwards than in backs (2.46 ± 0.92 vs 2.36 ± 0.93 m.s⁻², respectively). Back rows had the highest mean acceleration value, compared to front rows, inside backs and outside backs (2.50 ± 0.95 , 2.41 ± 0.89 , 2.38 ± 0.90 and 2.34 ± 0.98 m.s⁻², respectively; $P < 0.001$). Inside backs and outside backs both had significantly lower mean acceleration values than front rows ($P < 0.05$), while outside backs had significantly lower mean values than inside backs ($P < 0.05$).

Overall analysis of results, illustrated in Figure 2, demonstrated that the majority of match acceleration values ($41.2 \pm 7.6\%$) ranged between 1 and 2 m.s⁻². The percentage of acceleration values of the category “acceleration ranging between 2 and 3 m.s⁻²” and of the category “acceleration >3 m.s⁻²” represented 37.7 ± 3.9 and $21.1 \pm 6\%$ of the total number of accelerations, respectively. Acceleration started mainly from jogging ($31.8 \pm 5\%$) or standing–walking activity categories ($53.4 \pm 5.5\%$); the percentage was significantly higher in front rows and outside backs than in inside backs ($86.5 \pm 3.0\%$ and $85.7 \pm 4.7\%$ vs $82.7 \pm 3.1\%$, respectively; $P < 0.05$) but no significant difference emerged between forwards and backs as a whole.

As can be seen in Figure 2, back rows had a lower percentage of acceleration values ranging between 1 and 2 m.s⁻² than the other subgroups, with a higher percentage of acceleration values >3 m.s⁻² than inside backs and outside backs in the medium-intensity run, jogging and walking–standing zones. Front rows had the lowest percentage of acceleration values from running velocities higher than maximal aerobic velocity.

First Half vs Second Half

As seen in Table V, whatever the positional group, no significant differences in the percentage of exercise-period type or intensity, exercise duration or E:R were observed between the two halves, except that the percentage of ratios ranging between 1:4 and 1 decreased significantly between the two halves of the match for backs.

Mean acceleration, on the other hand, was significantly greater during the first half than the second half (2.45 ± 0.95 vs 2.38 ± 0.90 m.s⁻², respectively; $P < 0.001$), in both forwards and backs (2.49 ± 0.93 vs 2.42 ± 0.91 m.s⁻², and 2.39 ± 0.97 vs 2.33 ± 0.89 m.s⁻², respectively). Analysis by subgroup found that mean acceleration

Table III. Distribution of the ratio of exercise duration to recovery duration (E:R; % of the total number of ratios) classified by exercise duration for each group and subgroup and for each exercise intensity.

	Exercise duration	<2 s			2–4 s			>4 s		
		Ratio	E:R < 1:4	1:4 < E:R < 1	E:R > 1	E:R < 1:4	1:4 < E:R < 1	E:R > 1	E:R < 1:4	1:4 < E:R < 1
Static activity	Front row	6.2 ± 3.2	1.5 ± 1.1	0.1 ± 0.3	8.7 ± 2.7	3.0 ± 1.4	1.0 ± 1.1	5.5 ± 1.5	4.0 ± 1.8	3.3 ± 2.0
	Back row	5.9 ± 2.9	1.5 ± 1.2	0.4 ± 0.5	7.6 ± 3.0	2.8 ± 1.3	1.4 ± 1.0	5.0 ± 2.1	2.9 ± 1.7	4.5 ± 3.1
	All forwards	6.0 ± 3.0	1.5 ± 1.2	0.3 ± 0.4	8.2 ± 2.9	2.9 ± 1.3	1.2 ± 1.1	5.2 ± 1.8	3.4 ± 1.8	3.9 ± 2.7
	Inside backs	3.4 ± 1.6 ^{ab}	0.7 ± 0.6 ^a	0.3 ± 0.5	2.3 ± 1.7 ^{ab}	1.3 ± 1.0 ^{ab}	0.4 ± 0.6 ^b	0.2 ± 0.5 ^{ab}	0.4 ± 0.4 ^{ab}	0.1 ± 0.3 ^{ab}
	Outside backs	3.4 ± 2.4 ^{ab}	0.5 ± 0.5 ^{ab}	0.3 ± 0.5	1.9 ± 1.1 ^{ab}	0.2 ± 0.5 ^{abc}	0.5 ± 0.6 ^b	0.7 ± 0.7 ^{ab}	0.2 ± 0.5 ^{ab}	0.1 ± 0.2 ^{ab}
	All backs	3.4 ± 2.0*	0.6 ± 0.6*	0.3 ± 0.5	2.1 ± 1.4*	0.8 ± 0.9*	0.4 ± 0.6*	0.4 ± 0.6*	0.3 ± 0.5*	0.1 ± 0.3*
	>MAV	Front row	3.9 ± 2.3	1.7 ± 1.4	1.3 ± 1.2	3.0 ± 2.2 ^{cd}	1.7 ± 1.0 ^{cd}	1.9 ± 1.3 ^c	4.0 ± 2.6 ^{cd}	4.6 ± 1.6 ^{cd}
Back row	2.6 ± 2.5 ^{ac}	1.1 ± 0.9 ^c	0.7 ± 0.9	2.6 ± 1.4 ^{cd}	1.4 ± 1.0 ^{cd}	2.2 ± 1.2 ^c	4.1 ± 2.8 ^{cd}	4.0 ± 2.0 ^{cd}	5.4 ± 2.6 ^{cd}	
All forwards	3.2 ± 2.4*	1.4 ± 1.2*	1.0 ± 1.1	2.8 ± 1.8*	1.6 ± 1.0*	2.1 ± 1.2*	4.1 ± 2.7*	4.3 ± 1.8*	5.3 ± 2.4*	
	Inside backs	4.8 ± 1.9	2.3 ± 1.2	0.7 ± 0.7	6.4 ± 2.6 ^d	3.3 ± 1.6	3.6 ± 1.1	9.7 ± 3.2 ^d	8.2 ± 3.2	10.2 ± 4.7
	Outside backs	5.7 ± 2.8	2.5 ± 2.1	1.4 ± 2.3	10.7 ± 5.1	4.3 ± 2.6	2.9 ± 1.4	12.6 ± 3.8	7.4 ± 3.2	8.0 ± 2.7
	All backs	5.2 ± 2.4	2.4 ± 1.7	1.0 ± 1.7	8.5 ± 4.5	3.8 ± 2.2	3.3 ± 1.3	11.1 ± 3.8	7.8 ± 3.2	9.1 ± 4.0
Medium-intensity run	Front row	8.8 ± 3.7 ^c	3.8 ± 2.2	1.7 ± 1.1	7.3 ± 3.7	3.7 ± 2.0	2.5 ± 1.5	4.1 ± 1.8	4.0 ± 2.4	3.6 ± 2.3
	Back row	10.4 ± 3.7	4.5 ± 2.5	1.7 ± 1.5	6.3 ± 1.7 ^{cd}	4.3 ± 1.8	3.3 ± 2.2	4.6 ± 2.7	4.3 ± 2.1	4.6 ± 2.8
	All forwards	9.6 ± 3.8	4.1 ± 2.3	1.7 ± 1.3	6.8 ± 2.9*	4.0 ± 1.9	2.9 ± 1.9	4.4 ± 2.3	4.1 ± 2.2	4.1 ± 2.6
	Inside backs	10.9 ± 2.2	3.6 ± 2.5	1.3 ± 1.1	8.3 ± 2.1	4.1 ± 2.1	2.5 ± 1.6	3.1 ± 1.3 ^b	4.9 ± 2.1	3.2 ± 2.7
	Outside backs	10.7 ± 3.6	2.7 ± 1.9 ^b	0.7 ± 1.0 ^{ab}	9.5 ± 3.4	3.4 ± 2.3	1.6 ± 2.1 ^b	3.9 ± 3.1	2.7 ± 2.3 ^{bc}	1.7 ± 1.9 ^{ab}
	All backs	10.8 ± 2.9	3.2 ± 2.3	1.0 ± 1.1*	8.8 ± 2.8	3.8 ± 2.2	2.1 ± 1.8	3.5 ± 2.3	3.9 ± 2.4	2.5 ± 2.4*

Notes: ^aSignificantly different to front row forwards, $P < 0.05$; ^bSignificantly different to back row forwards, $P < 0.05$; ^cSignificantly different to inside backs, $P < 0.05$; ^dSignificantly different to outside backs, $P < 0.05$. *Significant between group (forward and back) differences, $P < 0.05$. Grey cells, percentage of E:R higher than 5%. MAV: maximal aerobic velocity.

Table IV. Percentage of exercise periods according to exercise intensity, exercise duration and ratio of exercise duration to recovery duration (E:R) for each group and subgroup.

	Exercise intensity			Exercise duration			Ratio		
	Medium-intensity run	>MAV	Static activity	0–2 s	2–4 s	>4s	E:R < 1:4	1:4 < E:R < 1	E:R > 1
Front row (20)	39.5 ± 12.2	27.2 ± 9.2 ^{cd}	33.3 ± 5.6	29.0 ± 4.0	32.8 ± 4.4	38.2 ± 4.2	51.4 ± 6.2 ^d	27.9 ± 4.8	20.6 ± 4.4 ^b
Back row (20)	44.0 ± 14.4	24.1 ± 9.0 ^{cd}	31.8 ± 7.8	28.7 ± 4.8	32.0 ± 2.8	39.3 ± 4.4	49.1 ± 5.4 ^d	26.7 ± 5.6	24.2 ± 4.4
Forwards (40)	41.8 ± 13.4	25.7 ± 9.2*	32.6 ± 6.8	28.8 ± 4.4	32.4 ± 3.7	38.8 ± 4.3	50.3 ± 5.9	27.3 ± 5.1	22.4 ± 4.7
Inside back (14)	41.9 ± 7.2	49.0 ± 7.8	9.1 ± 3.1 ^{ab}	27.9 ± 4.1	32.1 ± 4.1	40.0 ± 6.4	48.9 ± 5.0 ^d	28.8 ± 4.0	22.3 ± 6.3
Outside back (13)	37.0 ± 12.2	55.4 ± 13.0	7.6 ± 3.4 ^{ab}	27.8 ± 4.6	35.0 ± 6.0	37.2 ± 4.9	59.0 ± 6.6	23.9 ± 7.2	17.1 ± 4.3 ^{abc}
Backs (27)	39.6 ± 10.1	52.1 ± 10.9	8.4 ± 3.2*	27.8 ± 4.3	33.5 ± 5.2	38.7 ± 5.8	53.8 ± 7.7	26.4 ± 6.1	19.8 ± 5.9

Notes: ^aSignificantly different to front row forwards, $P < 0.05$; ^bSignificantly different to back row forwards, $P < 0.05$; ^cSignificantly different to inside backs, $P < 0.05$; ^dSignificantly different to outside backs, $P < 0.05$. *Significant between group (forwards and backs) differences, $P < 0.05$. MAV: maximal aerobic velocity. In parenthesis, the number of files analysed.

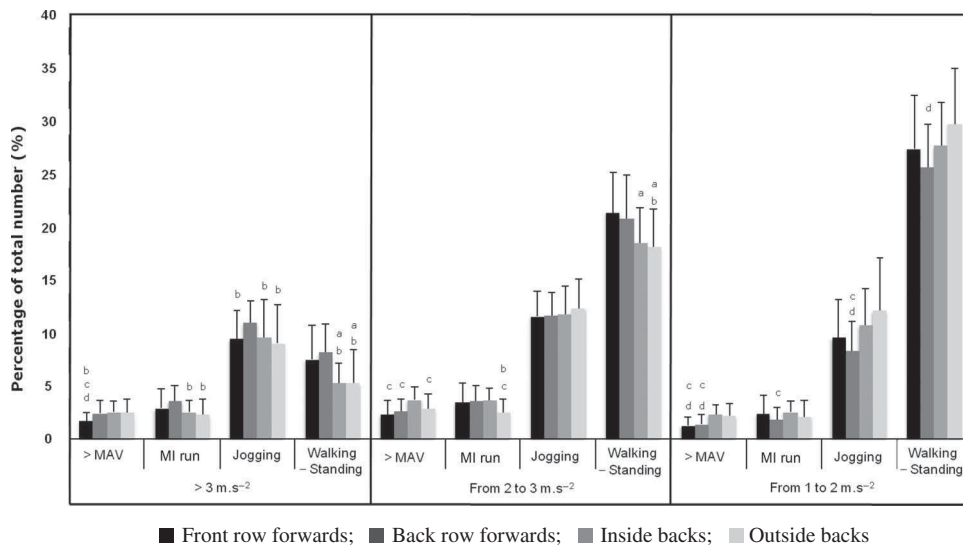


Figure 2. Distribution of acceleration (percentage of total number of acceleration values) according to intensity category (67 files). **a** Significantly different to front row forwards, $P < 0.05$; **b** Significantly different to back row forwards, $P < 0.05$; **c** Significantly different to inside backs, $P < 0.05$; **d** Significantly different to outside backs, $P < 0.05$. MAV: maximal aerobic velocity. MI run: medium-intensity running.

values decreased significantly only for back rows (2.55 ± 0.96 vs 2.45 ± 0.94 ; $P < 0.001$), whereas only a trend was observed for the other subgroups.

Discussion

The purpose of the current study was to propose a complementary approach to classic time–motion analysis to improve the understanding of the physical demand of international rugby union match play. Results indicated that about 65% of exercise periods lasted less than 4 s; half of the E:Rs were less than 1:4 and about one-third ranged between 1 and 1:4; and about 40% of exercise periods were classified as medium intensity. Most acceleration values were less than $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ and started from standing or walking activity. Back rows showed the highest mean acceleration values over the game. Analysis in subgroups demonstrated that only back rows showed a significant decrease in the mean acceleration between the two halves. The E:Rs and their repartition in duration and intensity categories did not vary over the game.

The anthropometric characteristics of the studied group were in line with those presented in previous studies concerning elite professional rugby union (Fuller, Taylor, Brooks, & Kemp, 2013; Higham, Pyne, & Mitchell, 2013; Holway & Garavaglia, 2009; Sedeaud et al., 2012). To our knowledge, the current study is the first to present mean values of maximal aerobic velocity and of VL4% in a group of international rugby union players.

The methodological originality of the present study was the choice of individual velocity threshold. In a recent study by Cahill, Lamb, Worsfold, Headey, and Murray (2013), individual thresholds corresponding to maximal running velocity were used to quantify the movement characteristics of English premiership players. It is generally accepted that fatigue occurs quickly during supra-maximal exercise intensities (i.e. greater than maximal aerobic velocity). Accordingly, the choice of maximal aerobic velocity as threshold to define high intensity seems justified, especially for assessing physical demand. In the present study,

Table V. Evolution of the percentage of exercise periods according to exercise intensity, exercise duration and the ratio of exercise duration to recovery duration (E:R) between the two halves (H1 and H2).

		Exercise intensity			Exercise duration			Ratio		
		Medium-intensity run	>MAV	Static activity	0–2s	2–4s	>4s	E:R < 1:4	1:4 < E:R < 1	E:R > 1
Forwards (19)	H1	36.1 ± 11.6	28.0 ± 8.3	35.9 ± 6.3	28.8 ± 6.1	32.6 ± 4.3	38.6 ± 5.2	51.1 ± 7.6	26.4 ± 5.8	22.4 ± 5.0
	H2	36.7 ± 10.2	27.6 ± 10.2	35.8 ± 3.5	29.1 ± 4.8	31.8 ± 3.4	39.1 ± 6.0	51.3 ± 5.8	24.6 ± 4.5	24.0 ± 6.3
Backs (18)	H1	42.0 ± 10.3	49.4 ± 10.7	8.6 ± 3.4	27.0 ± 4.8	36.0 ± 5.1	37.0 ± 6.2	51.7 ± 8.1	28.5 ± 6.4	19.8 ± 6.6
	H2	43.1 ± 11.4	48.3 ± 11.3	8.5 ± 5.0	28.7 ± 6.9	34.8 ± 7.0	36.5 ± 8.0	54.4 ± 7.9	23.8 ± 6.0*	21.9 ± 5.9

Notes: *Significantly different to H1, $P < 0.05$. MAV: maximal aerobic velocity. In parenthesis, the number of files analysed.

maximal aerobic velocity tended to be lower in front rows. This confirms that by using a single velocity threshold to define high intensity tends to systematically underestimate physical demand in players with lower maximal aerobic velocity values (Abt & Lovell, 2009). It can be assumed that previous studies, which used a fixed-intensity threshold, to define high-intensity category, did not dispose of individual reference values such as maximal aerobic velocity.

In most studies, active participation in scrums, rucks and mauls is timed from when the player has any contact with another player, whereas in the current study, participation was only considered to be when specifically the player's shoulder was in contact. Consequently, the mean duration of static activity in the present study (4.15 and 2.21 s for forwards and backs, respectively) was lower than in other reports (5 to 7.1 and 3.6 to 4.2 s, respectively) (Deutsch et al., 2007; Duthie et al., 2005; Roberts et al., 2008). The mean number of static activity bouts for forwards (about 53, including 22 scrums) was significantly less than in previous studies (ranging between 80 and 105) (Deutsch et al., 2007; Duthie et al., 2005; Roberts et al., 2008). It is not possible to determine whether these differences are due to the methodology and/or to the playing level and style of the teams studied. Nevertheless, the methods used in different studies cannot influence the total number of scrums. The current results demonstrated a mean value of 22 scrums per match. This is consistent with the value of around 25 scrums per match reported by Quarrie et al. (2013) during south hemisphere international game.

In agreement with the studies of Austin et al. (2011b), total exercise time was similar for front rows (11.9 min), back rows (11.2 min) and inside backs (10.4 min), but significantly shorter for outside backs (7.1 min). Consistent with this, the total number of ratios (exercise + recovery events) was the lowest in outside backs (118). Table IV shows that forwards were more involved in static activity than backs, while backs were more involved in supramaximal runs than forwards. Forwards (7,006 m) were found to cover a shorter total distance than backs (7,944 m). This is related to the fact that front rows covered the shortest total distance (6,935 m). This finding is in line with those of Austin et al. (2011b) and Roberts et al. (2008). It is noteworthy that, in agreement with Austin et al. (2011b), back rows and outside backs covered similar total distances whereas inside backs tended to cover the longest. The shorter distance covered by front rows is consistent with their lower maximal aerobic velocity. Further studies are needed to investigate whether maximal aerobic velocity value could represent the limitation to total distance covered.

The players' competitive level and/or the methodological approach of the present study differs from previous studies (Austin et al., 2011b; Deutsch et al., 2007; Duthie et al., 2005; Quarrie et al., 2013; Roberts et al., 2008), making comparison difficult. However, it can be concluded that the overall characteristics and between-group differences observed in the present study were similar to those observed in elite southern hemisphere and English rugby union teams.

Nevertheless, total distance covered gives no information on intensity of displacement, which is what determines metabolic workload. During intermittent activity, the exercise duration in different velocity zones or analysis of mean velocity gives partial information on metabolic workload: the acceleration should be taken into account in order to better estimate metabolic workload.

Figure 2 shows that most acceleration values were less than $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. In line with the present results, Cunniffe et al. (2009) reported that most acceleration values attained in 1 s ranged between 1.5 and $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. The present results also demonstrated that the mean duration of acceleration phases exceeding $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ was less than 1 s, with a mean maximal duration ranging between 3 and 4 s. Mean acceleration value was 4.2% greater in forwards than in backs, and back rows showed the greatest mean acceleration over the match as a whole. The studies of Crewther, Lowe, Weatherby, Gill, and Keogh (2009) reported that the ability to accelerate over short distance (10 and 20 m) is greater in backs than in forwards. It could be supposed that the higher acceleration value observed in forwards does not reflect a better ability to accelerate but rather reflects the game demands of this position. Consistent with the finding of Cahill et al. (2013) and the normal game demands, the present results also underline the high-intensity workload in back rows compared to front rows, inside backs or outside backs.

According to Osgnach et al. (2010), metabolic power is influenced by both initial running velocity and acceleration: for a given acceleration, the higher the initial running velocity the higher the metabolic power. As illustrated by Figure 2, most acceleration values started at intensities corresponding to recovery. It is interesting to note that forwards, and particularly back rows, were more involved in acceleration values exceeding $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, while inside backs were more involved in acceleration values corresponding to a medium- or high-intensity run. Consistent with the finding of Duthie, Pyne, Marsh, and Hooper (2006), in forwards, most acceleration values have started when they were standing or walking. This may be due to forwards having to produce higher acceleration to attain the same running velocity than backs

involved in acceleration values corresponding to a medium- or high-intensity run.

As discussed earlier, intermittent activity could be characterised by the analysis of the distribution of E:Rs according to exercise durations and intensity categories. The mean ratio (calculated by dividing mean exercise duration by mean recovery duration) was 1:6.5 and 1:8.5 in forwards and backs respectively. This is consistent with the range of 1:4 and 1:25 observed in previous studies (Austin et al., 2011b; Deutsch et al., 2007; Duthie et al., 2005; Eaton & George, 2006). An overall analysis of the data shown in Table IV demonstrates that: (1) in agreement with Duthie et al. (2005), about 65% of exercise periods lasted less than 4 s; (2) half the E:Rs were less than 1:4 and about one-third ranged between 1 and 1:4; and (3) about 40% of exercise periods were classified as of medium intensity. If one considers ratio distribution and the fact that short-duration high-intensity (near maximal) phases of static activity or sprints occurred evenly and were interspersed by exercise and recovery periods varying in intensity and duration, a decrease in the performance due to fatigue is not obvious. In line with previous studies (Cunniffe et al., 2009; Duthie et al., 2005; Roberts et al., 2008), analysis of the evolution of individual activity between halves failed to demonstrate a significant decrease in the performance when the characteristics of individual exercise periods were considered. Nevertheless, a slight but significant decrease of 2.9% in the mean acceleration was found during the second half, which might be attributed to fatigue and/or to a strategic decrease in activity level linked to scores (Lago, Casais, & Dominguez, 2010). Mean acceleration decreased (by 2.8% and 2.5%, respectively) in both forwards and backs during the second half, but the decrease was significant only in back rows, which may be related to the significantly higher percentage of E:Rs >1 and higher percentage of acceleration values exceeding $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ in back rows than in the other subgroups. This decrease in acceleration could also be related to significantly lower values of $V_{Ia4\%}$ in back rows, a parameter generally associated with endurance quality.

This result also underlines the interest of analysing acceleration in intermittent activity. Nevertheless, the accuracy and reliability of acceleration calculated from a double derivative of displacement sampled at 10 Hz and the small number of players within each subgroup call for caution in generalising the results. Further studies using new technologies (GPS and accelerometry) are needed to confirm the present findings.

Conclusion

To the best of our knowledge, this is the first study to analyse the physical demands of elite rugby union

during five complete international matches using semi-automated video analysis, and to consider mean intensity during each individual exercise period. Despite methodological limitations, the analysis of results demonstrates the interest of analysing acceleration and E:R ratios to estimate physical demand. This approach enabled us to show that back rows were the players with the highest acceleration level but tended to decrease it during the second half. These current results tended to show that the combination of action and recovery times was optimal to prevent any serious decrease in performance. Consistent with the earlier studies, the results demonstrated that international rugby matches place specific physical demands on players occupying the various positional groups. This has practical implications. First, conditioning programmes could differ from a qualitative point of view between positional subgroups: for example, forwards and particularly back rows should improve their ability to accelerate and to repeat acceleration. The distribution of ratios presented in the current study could also be helpful in designing specific intermittent exercises. Second, the current results suggested that substitutions of players during a match should mainly concerned forwards and particularly back rows.

Acknowledgements

We are very grateful to Paola Sibi, Julien Robineau, Julien Deloire, Nicolas Barizien and Hugo Maciejewski for their precious help in field data collection. We also gratefully thank Professor J.R. Lacour and the reviewers for their constructive comments that have significantly improve the manuscript.

References

- Abt, G., & Lovell, R. (2009). The use of individualized speed and intensity thresholds for determining the distance run at high-intensity in professional soccer. *Journal of Sports Sciences*, 27(9), 893–898.
- Åstrand, I., Åstrand, P. O., Christensen, E. H., & Hedman, R. (1960). Intermittent muscular work. *Acta Physiologica Scandinavica*, 48, 448–453.
- Austin, D., Gabbett, T., & Jenkins, D. (2011a). Repeated high-intensity exercise in professional rugby union. *Journal of Sports Sciences*, 29(10), 1105–1112.
- Austin, D., Jenkins, D., & Gabbett, T. (2011b). The physical demands of Super 14 rugby union. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 14(3), 259–263.
- Balsom, P. D., Seger, J. Y., Sjodin, B., & Ekblom, B. (1992). Physiological responses to maximal intensity intermittent exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 65(2), 144–149.
- Bogdanis, G. C., Nevill, M. E., Lakomy, H. K., Graham, C. M., & Louis, G. (1996). Effects of active recovery on power output during repeated maximal sprint cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 74(5), 461–469.
- Cahill, N., Lamb, K., Worsfold, P., Headey, R., & Murray, S. (2013). The movement characteristics of English Premiership rugby union players. *Journal of Sports Sciences*, 31(3), 229–237.

- Crewther, B. T., Lowe, T., Weatherby, R. P., Gill, N., & Keogh, J. (2009). Neuromuscular performance of elite rugby union players and relationships with salivary hormones. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23, 2046–2053.
- Cunniffe, B., Proctor, W., Baker, J. S., & Davies, B. (2009). An evaluation of the physiological demands of elite rugby union using Global Positioning System tracking software. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(4), 1195–1203.
- Deutsch, M. U., Kearney, G. A., & Rehrer, N. J. (2007). Time-motion analysis of professional rugby union players during match-play. *Journal of Sports Sciences*, 25(4), 461–472.
- Deutsch, M. U., Maw, G. J., Jenkins, D., & Reaburn, P. (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 Prampero, P. E., Fusi, S., Sepulcri, L., Morin, J. B., Belli, A., & Antonutto, G. (2005). Sprint running: A new energetic approach. *Journal of Experimental Biology*, 208(Pt 14), 2809–2816.
- Duthie, G., Pyne, D., & Hooper, S. (2003). Applied physiology and game analysis of rugby union. *Sports Medicine*, 33(13), 973–991.
- Duthie, G., Pyne, D., & Hooper, S. (2005). Time motion analysis of 2001 and 2002 Super 12 rugby. *Journal of Sports Sciences*, 23(5), 523–530.
- Duthie, G. M., Pyne, D. B., Marsh, D. J., & Hooper, S. L. (2006). Sprint patterns in rugby union players during competition. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(1), 208–214.
- Eaton, C., & George, K. (2006). Position specific rehabilitation for rugby union players. Part I: Empirical movement analysis data. *Physical Therapy in Sport*, 7(1), 22–29.
- Fuller, C. W., Taylor, A. E., Brooks, J. H. M., & Kemp, S. P. T. (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.
- Higham, D. G., Pyne, D. B., & Mitchell, J. A. (2013). Rugby union players. In R. K. Tanner & C. J. Gore (Eds.), *Physiological tests in elite athletes* (2nd ed.) (pp. 379–396). Canberra: Australian Institute of Sport.
- Holway, F. E., & Garavaglia, R. (2009). Kinanthropometry of Group I rugby players in Buenos Aires, Argentina. *Journal of Sports Sciences*, 27(11), 1211–1220.
- Hughes, M., Evans, E., & Wells, J. (2001). Establishing normative profiles in performance analysis. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 1, 1–26.
- Lago, C., Casais, L., & Dominguez, E. (2010). The effects of situational variables on distance covered at various speeds in elite soccer. *European Journal of Sport Science*, 10(2), 103–109.
- Leger, L., & Boucher, R. (1980). An indirect continuous running multistage field test: The Université de Montreal track test. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences*, 5(2), 77–84.
- McLean, D. A. (1992). Analysis of the physical demands of international rugby union. *Journal of Sports Sciences*, 10(3), 285–296.
- Osgnach, C., Poser, S., Bernardini, R., Rinaldo, R., & di Prampero, P. E. (2010). Energy cost and metabolic power in elite soccer: A new match analysis approach. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(1), 170–178.
- Quarrie, K. L., Hopkins, W. G., Anthony, M. J., & Gill, N. D. (2013). Positional demands of international rugby union: Evaluation of player actions and movements. *Journal of Sciences and Medicine in Sport*, 16(4), 353–359.
- Roberts, S. P., Trewartha, G., Higgitt, R. J., El-Abd, J., & Stokes, K. A. (2008). The physical demands of elite English rugby union. *Journal of Sports Sciences*, 26(8), 825–833.
- Sedeaud, A., Marc, A., Schipman, J., Tafflet, M., Hager, J.-P., & Toussaint, J.-F. (2012). How they won Rugby World Cup through height, mass and collective experience. *British Journal of Sports Medicine*, 46(8), 580–584.
- Spencer, M., Bishop, D., & Dawson, B. (2006). Metabolism and performance in repeated cycle sprints: Active versus passive recovery. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(8), 1492–1499.
- Spencer, M., Dawson, B., Goodman, C., Dascombe, B., & Bishop, D. (2008). Performance and metabolism in repeated sprint exercise: Effect of recovery intensity. *European Journal of Applied Physiology*, 103(5), 545–552.
- Vigne, G., Gaudino, C., Rogowski, I., Alloatti, G., & Hautier, C. (2010). Activity profile in elite Italian soccer team. *International Journal of Sports Medicine*, 31(5), 304–310.
- Zubillaga, A. (2006). *La actividad del jugador de fútbol en alta competición: Análisis de variabilidad* (Doctoral thesis). University of Málaga, Spain.

Annexe 2 :

Lacome M, Piscione J, Hager JP, Bourdin M.

Neuromuscular fatigue during repeated maximal static exertion in international rugby union player (PP-PM63 Neuromuscular physiology 4; p541)

Communication sous forme de poster lors du congrès international du Collège Européen des Sciences du Sport (ECSS) Bruges, juillet 2012

Neuromuscular fatigue during repeated maximal static exertion in international rugby union player

Lacome M^{1,2}, Piscione J¹, Bourdin M²

¹, FFR ², University of Lyon, LBMC
(university Lyon 1-IFSTTAR)

Introduction

Rugby is an intermittent high intensity activity, with forwards mainly involved in static exertion whereas backwards performed more sprints. Physiological and metabolic responses of repeated-sprint had previously been well documented (e.g. (1)) but studies dealing with physiological consequences of repeated isometric activity were scarce. The aim of this study was to explore neuromuscular fatigue occurrence during repeated isometric maximal exercise simulating scrum effort.



Fig 1: Scrum Simulator and pushing position.

Material & Methods

16 French male international rugby union players (18.8 ± 0.4 years, 186 ± 5.5 cm, 100.8 ± 11.2 kg) accepted to participate.

They realized **twelve 5-s isometric static exertions** against a scrum simulator (FFR-Thales Scrum Simulator) interspaced with **15-s rest**.

Forces produced against the scrum simulator were recorded with three 3D forces sensors **MC5-10000** (AMTI inc, Waterdown, MA).

EMG signal was recorded for Rectus Femoris (**RF**), Vastus Medialis (**VM**) and Vastus Lateralis (**VL**). The signal was treated using two methods : Root Mean Square (**RMS**) and Mean Power Frequency (**MPF**).

Data were synchronized using a **Biopac MP150** (Biopac System inc, CA, USA).

Results

Mean force (F) decrease significantly from the 4th repetition to the end ($p < 0.05$).

MPF of the VL decrease significantly from the 3rd to the 12th repetition while MPF of the VM do not.

MPF of the RF decrease significantly from the 10th repetition to the end when compare to the 2nd, 3rd and 4th repetition ($p < 0.05$).

RMS of the VM decrease significantly from the 2nd repetition to the end, while RMS of the VL and RF decrease significantly from the 7th and 6th repetition to the 11th one respectively.

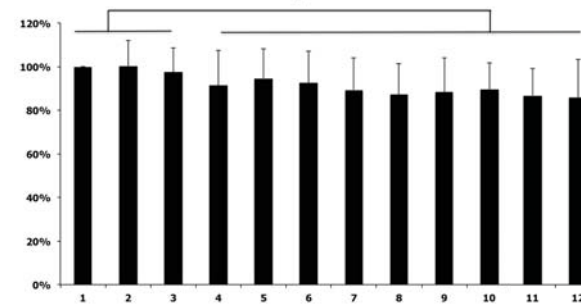


Fig 2: Normalized Mean force (%)

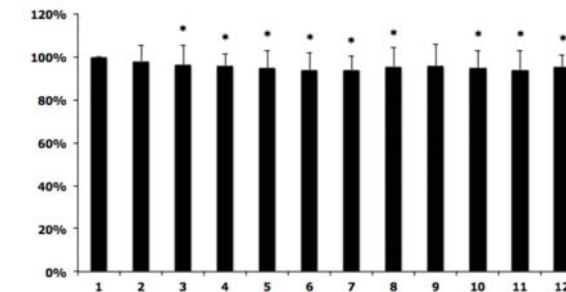


Fig 3: Normalized MPF of the VL (%)

* Significantly lower than 1st repetition ($p < 0.05$)

Discussion & Conclusion

According to the results, it could be concluded that VM was less in demand during the required exercise. Decrease in F was concomitant with decrease in MPF for VL from the 3rd repetition to the end. Within the context of isometric static exertion (2) it could be concluded that decrease in F could be attributed to peripheral fatigue of VL. This results tended to indicate that VL was the most in demand. MPF for RF decrease from the 10th repetition, this result could illustrate the specific role of bi-articular muscle in the control of force orientation (3). Lastly, the decrease in RMS for VL and RF indicates that central fatigue occurred at the half of the protocol. To summarize, decrease in F during the first part of exercise could be attributed to peripheral fatigue of VL. During the second, central fatigue could be suspected but F remained stable. supplementary analysis are in progress to test the hypothesis that force orientation was modified.

References

1. Spencer and al. Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities : specific to field-based team sports. Sports Med. 35(12):1025–1044 (2005).
2. Farina, D., Merletti, R. & Enoka, R.M. The extraction of neural strategies from the surface EMG. J. Appl. Physiol. 96, 1486–1495 (2004).
3. Van Ingen Schenau, J From rotation to translation: constraints on multijoint movements and the unique action of bi-articular muscles. Human movement Science. 8:301-337 (1989).

Analyse de la tâche et physiologie appliquée au rugby Etude de la fatigue associée à l'exercice maximal isométrique répété

L'objectif général de ce projet était d'analyser l'activité lors de compétitions de niveau international en rugby à XV et d'explorer l'évolution du niveau d'activité au cours du match pour quantifier la fatigue. Dans une première étude il a été démontré que le niveau d'activité ne variait pas de façon significative au cours du match si l'on quantifiait l'activité des joueurs par l'analyse de la vitesse et du rapport entre la durée d'activité et la durée de la récupération. Par contre, on observe une diminution significative de l'accélération moyenne sur la deuxième mi-temps, cette diminution étant plus particulièrement marquée pour le groupe constitué des troisièmes lignes et des talonneurs. Dans une deuxième étude, nous avons proposé d'étudier la fatigue lors de 12 répétitions d'exercice statique simulant la poussée en mêlée. Les résultats démontrent une diminution significative de la force produite de 11,7 % ce qui est relativement faible si l'on considère le protocole qui consistait à répéter 12 fois 5 s de poussée maximale entrecoupées de périodes de récupération de 15 s. Le faible coût métabolique de la contraction isométrique en comparaison de la contraction concentrique pourrait expliquer la diminution relativement faible de la force produite. L'ensemble de ces résultats suggère que l'enchaînement des séquences de jeu statiques et dynamiques et des périodes de récupération lors d'une compétition internationale permet de maintenir le niveau global d'activité.

Time motion analysis and Applied Physiology in Rugby union Study of fatigue associated with repeated isometric maximal exercise

The overall objective of this project was to analyze the activity at international level competitions in rugby union and to explore the evolution of the level of activity during the match to quantify fatigue. In the first study it was demonstrated that the level of activity did not vary significantly during the match if velocity and the ratio between duration of activity and of recovery periods were analyzed. A significant decrease in the average acceleration in the second half was evidenced; this decrease was particularly marked for the group constituted by back rows and hookers. In a second study, we proposed to study fatigue during static exercise simulating the scrum. The results show a significant decrease in the force produced by 11.7 %, which is relatively low considering that the protocol consisted in 12 time 5 s of maximum effort interspersed with recovery periods of 15 s. The low metabolic cost of isometric contraction compared to concentric contraction could explain the relatively small decrease of the force produced. Taken together, these results suggest that the players' combinations of action, static or dynamic, and recovery times were optimal for preventing large decrease in physical performance.

DISCIPLINE : Sciences des Activités Physiques et Sportives

MOT CLES : rugby à XV, analyse de la tâche, mêlée, force isométrique, fatigue, NIRS, EMG.

INTITULE ET ADRESSE DU LABORATOIRE :

Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs UMR_T_9406
Faculté Lyon-Sud Charles Mérieux BP12
69921 Oullins Cedex