



HAL
open science

Effets d'une saison de compétition sur les caractéristiques musculaires, biologiques et psychologiques de joueurs de handball de niveau international

Olivier Maurelli

► To cite this version:

Olivier Maurelli. Effets d'une saison de compétition sur les caractéristiques musculaires, biologiques et psychologiques de joueurs de handball de niveau international. Education. Université de Picardie Jules Verne, 2018. Français. NNT : 2018AMIE0062 . tel-03692141

HAL Id: tel-03692141

<https://theses.hal.science/tel-03692141>

Submitted on 9 Jun 2022

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

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



Thèse de Doctorat

Mention Biologie Santé
Spécialité STAPS Réadaptation, Sport-Santé

présentée à *l'Ecole Doctorale en Sciences Technologie et Santé (ED 585)*

de l'Université de Picardie Jules Verne

par

Olivier MAURELLI

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Picardie Jules Verne

Effets d'une saison de compétition sur les caractéristiques musculaires, biologiques et psychologiques de joueurs de handball de niveau international

Soutenue le 28 juin 2018 après avis des rapporteurs, devant le jury d'examen :

M. R. CANDAU, Professeur des universités

Rapporteur

M. B. JIDOVITSEFF, MCF HDR

Rapporteur

M. L. SCHMITT, Directeur de recherche

Examineur

M. S. MORIN, Chargé de recherches

Examineur

M. J. PRIOUX, Professeur des universités

Co-Directeur de thèse

M. S. AHMAIDI, Professeur des universités

Co-Directeur de thèse



*« Si tu abandonnes une fois, cela
peut devenir une habitude ...
n'abandonnes jamais »*

Mickael Jordan

A mes enfants
A ma famille
A mes proches
A papy...

Remerciements

Je voulais commencer la présentation de ces travaux en remerciant quelques personnes.

***M. Pr PRIOUX Jacques**, co-directeur de thèse : je ne saurais jamais comment te remercier pour tout ce que tu as fait pour moi. Tu m'as encadré, soutenu, stimulé, "secoué" et sans toi je ne serai pas là aujourd'hui. Ta rigueur scientifique et tes remarques sans cesse enrichissantes m'ont permis de concrétiser ce projet.*

***M. Pr AHMAÏDI Saïd**, co-directeur de thèse : je souhaite vraiment te remercier pour avoir accepté d'encadrer ma thèse. Je te suis reconnaissant pour tes qualités scientifiques, ton ouverture d'esprit et ta sagesse.*

***M. Pr CANDAU Robin**, je te remercie pour la confiance que tu me portes depuis tant d'années dans le cadre de mes interventions à l'UFR STAPS de Montpellier, et en acceptant de faire partie de ce jury. C'est un honneur pour moi.*

***M. Dr JIDOVITSEFF Boris**, une rencontre très riche cet hiver sur Louvain la Nouvelle, j'espère garder des liens scientifiques et humains, en tous cas merci d'avoir accepté la participation à ce jury.*

***M. Dr SCHMITT Laurent**, je suis très sensible à l'intérêt que tu as porté très rapidement à mon travail et au regard critique que tu as exercé depuis notre rencontre. J'espère que nous collaborerons très souvent par la suite. Enfin, merci d'accepter de juger mon travail.*

***M. Dr MORIN Stéphane**, nous nous suivons depuis quelques temps et j'ai toujours été admiratif de ton travail et de ton savoir scientifique, je suis donc très heureux que tu aies accepté de faire partie de ce jury.*

***M. Dr BERNARD Pierre Louis**, tu as été un relais scientifique sans faille sur Montpellier, toujours à l'écoute de mes demandes de jeune chercheur. Depuis une amitié et une envie de collaboration s'est installée... merci d'avoir été là et de rester là.*

M. Dr BRUN Jean Frédéric, expert des adaptations biologiques à l'exercice, merci de votre participation et de vos conseils avisés sur les adaptations biologiques à l'exercice physique.

M. CANAYER Patrice, entraîneur et manager du club du " Montpellier Handball " : merci de ta confiance tout au long de ces années, et surtout merci d'avoir autorisé ces travaux de recherche sur l'équipe professionnelle que tu encadres avec succès depuis tant d'années.

J'associe à ces remerciements M. PRADET Michel, professeur agrégé d'EPS et figure incontournable de la préparation physique en France. Ta personnalité et ton parcours professionnel ont toujours été un exemple pour moi et m'ont toujours guidé vers l'excellence.

Aussi, à M. PARIETTI Bruno, en tant que responsable des modules de formation au Creps de Montpellier sur l'entraînement et la préparation physique. Il y a 15 ans tu m'as donné une chance de reconversion après ma carrière. Aujourd'hui, tu es mon ami et je te remercie pour avoir toujours cru en moi, et m'avoir permis de relever ce défi si important.

A M. LIGUORI Sacha, étudiant en école d'ingénieurs, merci pour toutes ces heures passées à faire avancer ce projet, merci de ta disponibilité et tes compétences professionnelles, sans toi cette thèse n'aurait pas ce magnifique rendu.

Merci aussi à mes parents et mon frère Philippe, pour m'avoir toujours soutenu dans mes projets personnels et professionnels. À mes enfants, Thomas, 17ans, et Enzo, 4ans, pour avoir subi toutes ces contraintes sans comprendre pourquoi je travaillais sans cesse. Tant d'heures passées derrière mon ordinateur ou en voyage plutôt que de profiter de vous.

Merci à tous pour votre soutien sans faille tout au long de cette thèse de doctorat.

Cette thèse fut une remise en cause profonde de mes connaissances, et m'a permis de les enrichir considérablement, m'alertant sur les limites de certaines approches existant dans le monde de l'entraînement. Car le préparateur physique est un homme de terrain, caution du " savoir " qui applique des méthodes d'entraînement. Et les sciences du sport sont les bases indispensables du savoir qui permettent d'optimiser les procédés dans une démarche de performance.

Table des matières

Table des matières	v
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xiii
Liste des abréviations	xv
Valorisation scientifique	xix
1 Revue de littérature	1
1.1 Introduction	2
1.2 La locomotion du joueur de handball	4
1.2.1 Outils de mesure	5
1.2.1.1 Les systèmes de suivi semi-automatique	7
1.2.1.2 Les matériels portables	10
1.2.2 Etat de l'art	21
1.2.2.1 Distance totale parcourue en fonction des postes, des types et de l'intensité des déplacements.	21
1.2.2.2 Actions de hautes intensités : nature, fréquence et durée. . .	31
1.3 Profil anthropométrique du joueur de handball	33
1.3.1 Outils de mesure	33
1.3.2 Etat de l'art	34
1.4 Profils métaboliques du joueur de handball	43
1.4.1 Métabolisme aérobie	43
1.4.1.1 Outils de mesure	43
1.4.1.2 Etat de l'art	46
1.4.2 Métabolismes anaérobie (alactique et lactique)	50
1.4.2.1 Outils de mesure	50
1.4.2.2 Etat de l'art	52
1.5 Profil musculaire du joueur de handball	55
1.5.1 Outils de mesure	55

1.5.2	Etat de l'art	63
1.6	La quantification de la charge d'entraînement	68
1.6.1	Le concept de la charge d'entraînement externe	71
1.6.1.1	Outils de mesure et état de l'art	71
1.6.2	Le concept de la charge d'entraînement interne	71
1.6.2.1	Outils de mesure	71
1.6.2.2	Etat de l'art	84
1.6.3	Les dosages biologiques	86
1.6.4	La variabilité de fréquence cardiaque	95
1.6.4.1	Le système nerveux autonome : bases physiologiques	95
1.6.4.2	Outils de mesure	98
1.6.4.3	Etat de l'art	105
2	Contribution personnelle	111
2.1	Buts et orientation des études	112
2.2	Introduction générale des études 1 et 2	114
2.3	Etude 1	115
2.3.1	Introduction	115
2.3.2	Organisation générale	116
2.3.3	Sujets	117
2.3.4	Protocoles de test	119
2.3.4.1	Tests isocinétiques	119
2.3.4.2	Tests de vitesse maximale aérobie (VMA)	123
2.3.4.3	Test de 1 Répétition maximale	123
2.3.4.4	Mesures anthropométriques	124
2.3.4.5	Analyses statistiques	124
2.3.5	Résultats	124
2.3.5.1	Pic de couple	124
2.3.5.2	Puissance moyenne	125
2.3.5.3	Ratios dominant/non dominant, agoniste/antagoniste and mixte	127
2.4	Etude 2	128
2.4.1	Introduction	128
2.4.2	Organisation générale	128
2.4.3	Sujets et protocole	132
2.4.4	Analyses statistiques	132
2.4.5	Résultats	132
2.4.5.1	Pic de couple	132

2.4.5.2	Puissance moyenne	133
2.4.5.3	Ratios dominant/non dominant, agoniste/antagoniste et mixte	135
2.5	Discussion des études 1 et 2	136
2.5.1	Limites méthodologiques	142
2.5.2	Applications pratiques	142
2.6	Etude 3	144
2.6.1	Introduction	144
2.6.2	Organisation générale	146
2.6.2.1	Analyse des données d'entraînement et de compétition pendant toute la saison	150
2.6.2.2	Paramètres physiques	150
2.6.2.3	Paramètres biologiques	153
2.6.2.4	Paramètres psychologiques	153
2.6.2.5	Paramètres de variabilité de la fréquence cardiaque	153
2.6.2.6	Distribution des blessures	154
2.6.2.7	Analyses statistiques	154
2.6.3	Resultats préliminaires	156
2.6.3.1	Caractéristiques de l'entraînement	156
2.6.3.2	Caractéristiques anthropométriques	156
2.6.3.3	Paramètres physiques	156
2.6.3.4	Paramètres biologiques	157
2.6.3.5	Paramètres psychologiques	157
2.6.3.6	Description des réponses de variabilité de la fréquence cardiaque	160
2.6.4	Discussion des résultats préliminaires	160
2.6.5	Applications pratiques	167
2.7	Discussion générale	168
Conclusions et perspectives		171
Bibliographie		175
Valorisation du travail de thèse		215
Etude 1	
Etude 2	
Etude 3	

Liste des figures

1.1	Dimensions du terrain	2
1.2	Répartition des joueurs en fonction des postes de jeu	3
1.3	Caméra Panasonic MS-4	6
1.4	Illustration de l'utilisation du système DARTFISH®	6
1.5	Illustration du système Amisco®	7
1.6	Exemple d'utilisation du système Amisco®	8
1.7	Positionnement des 2 caméras du système SAGIT	9
1.8	Visuel de l'utilisation du système SAGIT	9
1.9	Schéma d'un type de capteur capacitif utilisé par les accéléromètres.	11
1.10	Deux accéléromètres de type uni-axial à gauche et un accéléromètre de type tri-axial à droite	11
1.11	Plusieurs modèles d'actimètres	12
1.12	Deux modèles de cardiofréquencemètre	13
1.13	Relation entre le pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$ et le pourcentage de fréquence cardiaque maximale (FC_{max}).	14
1.14	Nomogramme d'Astrand et Ryhming (1954)	14
1.15	MinimaxX v4.0 S4.	17
1.16	L'actiheart®	18
1.17	Sensor Wear Pro Armband®	19
1.18	Tee-shirt Hexoskin®	20
1.19	Modalités de déplacement du joueur de handball	22
1.20	Distance couverte par les joueurs selon les postes de jeu	23
1.21	Répartition des distances en fonction du temps (Michalsik et al., 2013)	24
1.22	Répartition des zones de déplacement en fonction d'un match	25
1.23	Répartition moyenne des intensités de déplacements du joueur de handball	27
1.24	Répartition des actions à haute intensité	31
1.25	Fréquence de distribution entre les actions à intensité maximale et celles à haute intensité	33
1.26	Déterminants de la performance en handball	36
1.27	Différents protocoles d'évaluation du métabolisme aérobie	45

1.28 M. Buchheit - Revue EPS N°32	45
1.29 Pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$ mesuré et estimé entre les jeux à effectif réduits et les exercices intermittents	47
1.30 Test de force-vitesse d'après Vandewalle et al. (1987)	50
1.31 Réalisation d'un test de Wingate	51
1.32 Réponse individuelle de FC et de $[La]_{sg}$ durant un match de niveau national.	55
1.33 Sargent test (1924).	58
1.34 Tests SJ et CMJ	58
1.35 Relation Force-Vitesse du muscle strié squelettique.	61
1.36 Modèle à deux composantes de Banister et al. (1975).	72
1.37 Modélisation de l'évolution de la fatigue, du niveau d'aptitude, et du niveau de performance en réponse à une charge de travail physique unique (une seule séance).	72
1.38 Comparaison, par rapport à la performance "réelle" (actual), de deux types de modèle de prédiction de la performance à partir de la charge de travail.	74
1.39 Les indicateurs diversifiés de la perception de l'effort en fonction des différents types de séances chez des rugbymen professionnels	77
1.40 Comparaison de différentes méthodes de quantification de la charge d'entraînement lors de différentes séances de football canadien	80
1.41 Formulaire de saisie du logiciel TrainingLoadPro.	83
1.42 Vue d'ensemble des évaluations réalisées au cours de l'étude d'Elloumi et al. (2008).	88
1.43 Taux de concentration de cortisol et testostérone salivaires (moyenne et écart-type).	89
1.44 Evolution de la concentration sanguine de la CPK à 3 moments différents de la saison chez des rugbymen professionnels.	91
1.45 Représentation du système nerveux orthosympathique et parasympathique.	96
1.46 Organisation des voies efférentes du système nerveux autonome.	97
1.47 Voies d'accès sympathique et parasympathique.	98
1.48 ECG et chaque onde P, Q, R, S et T signalée.	99
1.49 Détection des battements cardiaques et mesure de l'intervalle R-R entre deux battements consécutifs.	99
1.50 Task Force (1996) : exemple d'un enregistrement de 252 intervalles R-R consécutifs chez un sujet normal en position couchée de repos et suite à un Tilt test après le passage en position debout.	102
1.51 Analyse spectrale des intervalles R-R par FFT et AR.	103
1.52 Représentation de la méthode DFA permettant de mesurer l'autocorrélation d'une série et donc sa prédictibilité.	103

1.53 Représentation graphique du "Poincaré plot" des intervalles R-R sur un enregistrement cardiaque de 5 minutes.	104
1.54 Analyse des intervalles R-R dans 2 positions sur un enregistrement de 15 minutes.	105
1.55 Exemple de rapport d'enregistrement et d'analyse de VFC à partir du logiciel Kubios®	106
1.56 Typologie de fatigue déterminée à partir de la VFC	107
1.57 Indications d'outils intéressants afin de monitorer les variations d'état de forme selon le type de sport	108
2.1 Vue d'ensemble du protocole expérimental réalisé au cours de la saison 2013-2014	113
2.2 Evolution du volume d'entraînement pendant période de préparation pré-compétitive (Pc2P).	116
2.3 Illustration de l'appareil Biodex®	120
2.4 Représentation graphique des valeurs de force des fléchisseurs et extenseurs du genou.	120
2.5 Installation du sujet lors du test isocinétique.	122
2.6 Ceinture Polar® permettant l'enregistrement de la fréquence cardiaque en continue	123
2.7 Illustration de la méthode des 4 plis cutanés mesurés avec la pince Harpenden	124
2.8 Evolution du pic de couple en mode concentrique et excentrique avant et après Pc2P	125
2.9 Evolution de la puissance moyenne en mode concentrique et excentrique avant et après Pc2P	126
2.10 Vue d'ensemble des entraînements de développement de la force sur la saison de compétition	131
2.11 Évolution du nombre de blessures des membres inférieurs et du nombre de joueurs blessés pendant toute la saison	131
2.12 Evolution du pic de couple en mode concentrique et excentrique durant une saison entière	133
2.13 Evolution de la puissance moyenne en mode concentrique et excentrique durant une saison entière	134
2.14 Plan du protocole expérimental des études	147
2.15 Volume d'entraînement relatif	150
2.16 Passage d'un test de détente verticale	151
2.17 Cellules photoélectriques (Brower) utilisées pour le test de 5m départ arrêté	152

2.18 Evolution du nombre de jours cumulés de blessures et du nombre de joueurs blessés durant toute la saison	154
2.19 Evolution du score de Hooper durant toute la saison	159

Liste des tableaux

1.1 Exemple d'une analyse de suivi notationnelle	5
1.2 Répartition des actions selon les postes de jeu	26
1.3 Récapitulatif des distances parcourues.	28
1.4 Caractéristiques anthropométriques réparties en fonction du classement final	36
1.5 Récapitulatif des caractéristiques anthropométriques.	37
1.6 Récapitulatif des valeurs de $\dot{V}O_{2max}$	49
1.7 Paramètres mesurés au cours d'une épreuve d'effort maximale à charge croi- sante réalisée sur bicyclette ergométrique	53
1.8 Valeurs obtenues durant le test anaérobie de Wingate.	54
1.9 Evaluation de la 1-RM à partir de la table de Berger (1961)	56
1.10 Table de Brzycki (1993)	57
1.11 Analyse des valeurs de pic de couple des quadriceps.	65
1.12 Analyse des valeurs de pic de couple des ischios-Jambiers.	65
1.13 Valeurs moyennes et écart-type d'un protocole isocinétique.	67
1.14 Coefficients de corrélations entre les pic de couple isocinétique et les résul- tats aux tests de détente.	67
1.15 Exemple de variables utilisables pour quantifier charge d'entraînement (CE).	70
1.16 Zones d'intensité en relation avec FC_{max} (Edwards, 1993).	78
1.17 Facteurs de pondération pour chaque zone d'intensité d'entraînement (Mu- jika et al., 1996).	79
1.18 Echelle originelle de Borg (1970) et échelle modifiée (Foster et al., 2001) de la perception de l'effort.	80
1.19 Questionnaire à 54 items de la société française de médecine du sport (SFMS).	82
1.20 Répartition de CE sur l'ensemble de la saison de compétition en handball (Bresciani et al., 2010).	85
1.21 Scores au test de profil des états d'humeur (POMS) mesurés sur des joueurs de handball durant une saison entière.	86
1.22 Variations des paramètres hormonaux pour des joueurs de rugby durant une période de 6 semaines.	89
1.23 Prélèvements sanguins de testostérone et cortisol (Schelling et al., 2014). . .	90

1.24 Marqueurs biologiques mesurés chez des joueurs de handball pendant une saison entière.	94
2.1 Organisation du travail de développement de l'endurance pendant Pc2P	117
2.2 Organisation du travail de renforcement musculaire pendant Pc2P	118
2.3 Résultats des mesures de ratios à partir des tests isocinétiques avant et après Pc2P	127
2.4 Nombre et distribution des sessions d'entraînement sur l'année.	129
2.5 Programme d'entraînement sur la saison de compétition	130
2.6 Résultats des mesures de ratios à partir des tests isocinétiques avant et après Pc2P	135
2.7 Organisation annuelle des séances de force et d'endurance.	149
2.8 Valeurs moyennes des caractéristiques de l'entraînement au cours de la saison	156
2.9 Valeurs moyennes des caractéristiques anthropométriques au cours de la saison	156
2.10 Valeurs moyennes pour les paramètres physiques au cours de la saison.	157
2.11 Valeurs moyennes des paramètres biologiques durant la saison	157
2.12 Valeurs moyennes des paramètres psychologiques durant la saison	158
2.13 Valeurs moyennes pour les paramètres de variabilité de la fréquence cardiaque au cours de la saison	160

Liste des abréviations

1-RM répétition maximale.

AD adrénaline.

AEM angle d'efficacité maximale.

AiL ailier.

AiLD ailier droit.

AiLG ailier gauche.

AL arrière latéral.

ALD arrière latéral droit.

ALG arrière latéral gauche.

AP activité physique.

BPM battements par minute.

CE charge d'entraînement.

CE_{ext} charge d'entraînement externe.

CE_{int} charge d'entraînement interne.

CK créatine kinase.

[CK]_{sg} concentration de créatine kinase sanguine.

CMJ contre mouvement jump.

CR-P protéine C-réactive.

[C]_{sg} concentration de cortisol sanguine.

DC demi centre.

DE dépense énergétique.

DNDR ratio dominant versus non dominant.

DTP distance totale parcourue.

ECG électrocardiogramme.

EMG électromyographie.

ES "d" de Cohen.

ESIE Estimation Subjective de l'Intensité de l'Exercice.

FC fréquence cardiaque.

FC_{max} fréquence cardiaque maximale.

FC_{moy} fréquence cardiaque moyenne.

FFT transformation de Fourier rapide.

FR fréquence respiratoire.

[F]_{sg} concentration de ferritine sanguine.

F-V force-vitesse.

GB gardien de but.

GH hormone de croissance.

GPS géo-positionnement par satellites.

GSH glutathion réduit.

GSSG glutathion oxydé.

H hématocrite.

HF hautes fréquences.

[Hg] concentration en hémoglobine.

IGF-1 somatomédine C.

IGFBP-3 Growth Factor Binding Protein 3.

IGFBPs protéines de liaisons spécifiques.

IJ ischio-jambiers.

IJexc ischio-jambiers en excentrique.

IL-6 interleukines 6.

[La]_{sg} concentration de lactate sanguine.

LDH lactate déshydrogénase.

LF basses fréquences.

NA noradrénaline.

NN50 nombre d'intervalle R-R successifs de plus de 50ms.

PC pic de couple.

Pc2P période de préparation pré-compétitive.

PM puissance moyenne.

PMA puissance maximale aérobie.

Pmax puissance maximale.

pNN50 NN50 divisé par le nombre total d'intervalles R-R successifs.

POMS profil des états d'humeur.

PvT pivot.

Q quadriceps.

Qconc quadriceps en concentrique.

QRS dépolarisation ventriculaire.

QSFMS questionnaire de la société française de médecine du sport.

RAA ratio agoniste vs antagoniste.

REST-Q recovery-stress questionnaire.

RM ratio mixte.

RMSSD différence au carré des intervalles R-R.

RPE rating of perceived exertion.

SDNN écart type de la série complète d'intervalles R-R.

SFMS société française de médecine du sport.

SJ squat jump.

SN système nerveux.

SNA système nerveux autonome.

SNP système nerveux périphérique.

sRPE session rating of perceived exertion.

TA tension artérielle.

[T]/[C] rapport testostérone sur cortisol.

TDFM temps de développement de la force maximale.

TRIMP training impulse.

[T]_{sg} concentration de testostérone sanguine.

VFC variabilité de fréquence cardiaque.

VLf très basses fréquences.

VMA vitesse maximale aérobie.

$\dot{V}O_2$ consommation d'oxygène.

$\dot{V}O_{2max}$ consommation maximale d'oxygène.

XO xanthine oxydase.

Valorisation dans le cadre du travail de thèse

Articles originaux

Acceptés

MAURELLI O, BERNARD PL, DUBOIS R, AHMAIDI S, PRIOUX J. Effects of precompetitive preparation period on the isokinetic muscular characteristics in world class handball players. Journal of Strength and Conditioning Research.

MAURELLI O, BERNARD PL, DUBOIS R, AHMAIDI S, PRIOUX J. Effects of the competitive season on the isokinetic muscles parameters changes in world class handball players. Journal of Strength and Conditioning Research.

En soumission

MAURELLI O, MICHALSIK LB, SCHMITT L, DUBOIS R, BRUN JF, AHMAIDI S, PRIOUX J. Effects of an entire season on physical, biological and psychological changes in world-class male handball players. Journal of Strength and Conditioning Research.

Communications orales en congrès international

MAURELLI O, BERNARD PL, DUBOIS R, AHMAIDI S, PRIOUX J. Effets de la période pré-compétitive sur l'évolution du profil musculaire isocinétique des membres inférieurs de handballeurs professionnels de niveau international. ACAPS, Nantes, France, Octobre 2015.

MAURELLI O, BERNARD PL, DUBOIS R, AHMAIDI S, PRIOUX J. Effets de la période pré-compétitive sur l'évolution du profil musculaire isocinétique des membres inférieurs de handballeurs professionnels de niveau international. 2ème congrès international de l'Association Africaine des Sciences du Sport, Hammamet, Tunisie, Mars 2016.

MAURELLI O, BERNARD PL, DUBOIS R, AHMAIDI S, PRIOUX J. Effects of the precompetitive preparation period on the isokinetic profile international professional handball players. 21st Annual Congress of the European College of Sport Science. Vienne, Autriche, Juillet 2016.

MAURELLI O, BERNARD PL, DUBOIS R, AHMAIDI S, PRIOUX J. Effects of the competitive season on the isokinetic muscle parameters changes in world class handball players. 22st annual Congress of the European College of Sport Science. Essen, Allemagne, Juillet 2017.

MAURELLI O, MICHALSIK LB, SCHMITT L, DUBOIS R, BRUN JF, AHMAIDI S, PRIOUX J. Effects of an entire season on physical, biological and psychological changes in world-class male handball players. 23st annual Congress of the European College of Sport Science. Dublin, Ireland, Juillet 2018.

Valorisation hors cadre de la thèse

Articles originaux

Acceptés

DUBOIS R, PAILLARD T, LYONS M, **MAURELLI O**, PRIOUX J. (2017). Running and metabolic demands of elite rugby union assessed using traditional, metabolic power and heart rate monitoring methods. *Journal of Sports Science and Medicine*. 16, 84-92.

DUBOIS R, PAILLARD T, McGRATH D, CHAMARI K, LYONS M, **MAURELLI O**, POLLY S, PRIOUX J. (2017). Changes in training load, running performance, lower body power and biochemical characteristics of back players throughout a professional rugby union season. *Journal of Human Sport and Exercise*.

DUBOIS R, LYONS M, PAILLARD T, **MAURELLI O**, PRIOUX J. (2018). Influence of weekly workload on physical, physiological and psychological characteristics in professional rugby union player over a competitive season. *Journal of Strength and Conditioning Research*.

Conférences

MAURELLI O. Sport et Jeunes Sportifs. Sport Santé – Cros Languedoc-Roussillon. France, Novembre 2014.

MAURELLI O. Du bien-être à la performance : vers un entrainement adapté. Sport Santé – Cros Languedoc-Roussillon. France, Novembre 2015.

MAURELLI O. Conception de la préparation physique. Exemple dans un club de handball élite et au sein de l'équipe de France de volleyball. Journée de formation de l'Association Africaine des Sciences du Sport. Hammamet, Tunisie, Avril 2015.

MAURELLI O. Journée Sport Santé Préparation Physique. Université Paris Est-Creteil et département du Val de Marne. France, Avril 2016.

Ouvrages

MAURELLI O, PARIETTI B, VOUILLOT M. L'haltérophilie au service de la préparation physique. Editions AMPHORA, Parution : Avril 2015.

VIEU C, BOUCHE R, CAMPARGUE B, COUDERC A, COZZOLINO C, FREYA, GRANVORKA F, **MAURELLI O**, PAULY O, RICARD M, STEINER F, GENDRE P. Développement de l'intelligence de l'épaule. Edition INSEP, Parution : Décembre 2016.

RICARD M, MAURELLI O, ROUALEN F. Le Circuit training. Edition INSEP, Parution : Décembre 2016.

MAURELLI O, PARIETTI B, PRADET M. Le gainage pour le sportif. Editions AMPHORA, Parution : Janvier 2017.

COCHAND JY, **MAURELLI O**, PARIETTI B. Les gammes athlétiques pour le sportif. Editions AMPHORA, Parution : Mai 2018.

1

Revue de littérature



« Si vous ne pouvez expliquer quelque chose simplement, c'est que vous ne l'avez pas bien compris »

Albert Einstein

1.1 Introduction

Le handball est un sport collectif olympique créé en Allemagne en 1919. Il est pratiqué dans le monde entier. Environ 60 millions de joueurs, dans près de 800 000 équipes, pratiquent ce sport à travers le monde. Il consiste en un affrontement de 2 équipes, composées de 7 joueurs sur le terrain et de 7 remplaçants, pendant 2 mi-temps de 30 min sur un terrain de 40m de long par 20m de large (Figure 1.1). Pour remporter une victoire chacune des deux équipes cherche à marquer un but de plus que l'adversaire.

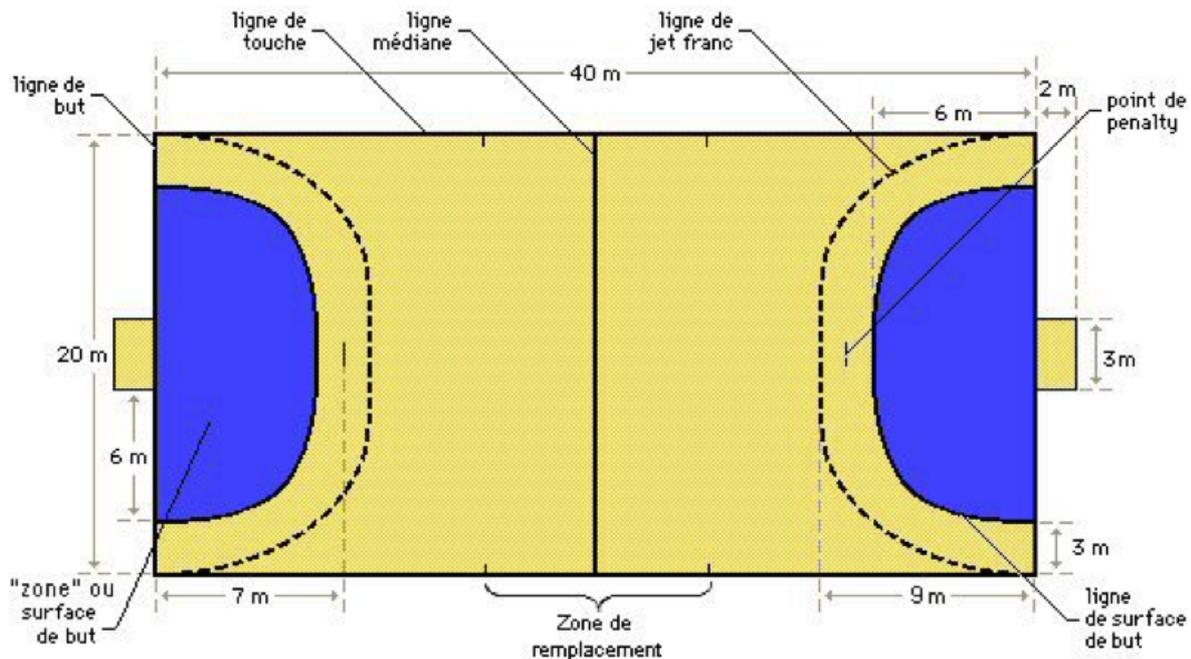


FIGURE 1.1 – Dimensions du terrain et postes de jeu ; Sources : Wikipédia.

Les joueurs évoluent à des postes précis (Figure 1.2) :

- Trois joueurs sur la base arrière : 1 arrière latéral droit (ALD), 1 arrière latéral gauche (ALG) et 1 demi centre (DC), le plus souvent meneur de jeu.
- Trois joueurs sur la base avant : 1 ailier droit (AiLD), 1 ailier gauche (AiLG) et 1 pivot (PvT), généralement positionné au sein de l'équipe adverse.
- Un gardien de but (GB), isolé dans une zone qui lui est réservée.

Cette organisation entraîne des particularités technico-tactiques et physiques, où tout poste de jeu demande des ressources propres. Les différentes actions qui caractérisent la pratique du handball sont les passes, les tirs et les duels offensifs et défensifs. Chacune de ces actions exige des qualités physiques de force et de puissance ainsi que des qualités physiques de vitesse et d'endurance (Gorostiaga et al., 2006). Le handball est aussi un sport de transition où les joueurs changent fréquemment de statut, passant d'un rôle d'attaquant à un rôle de défenseur. Enfin, une particularité importante du handball réside dans son règlement qui autorise les changements de joueurs à tout moment d'un match.

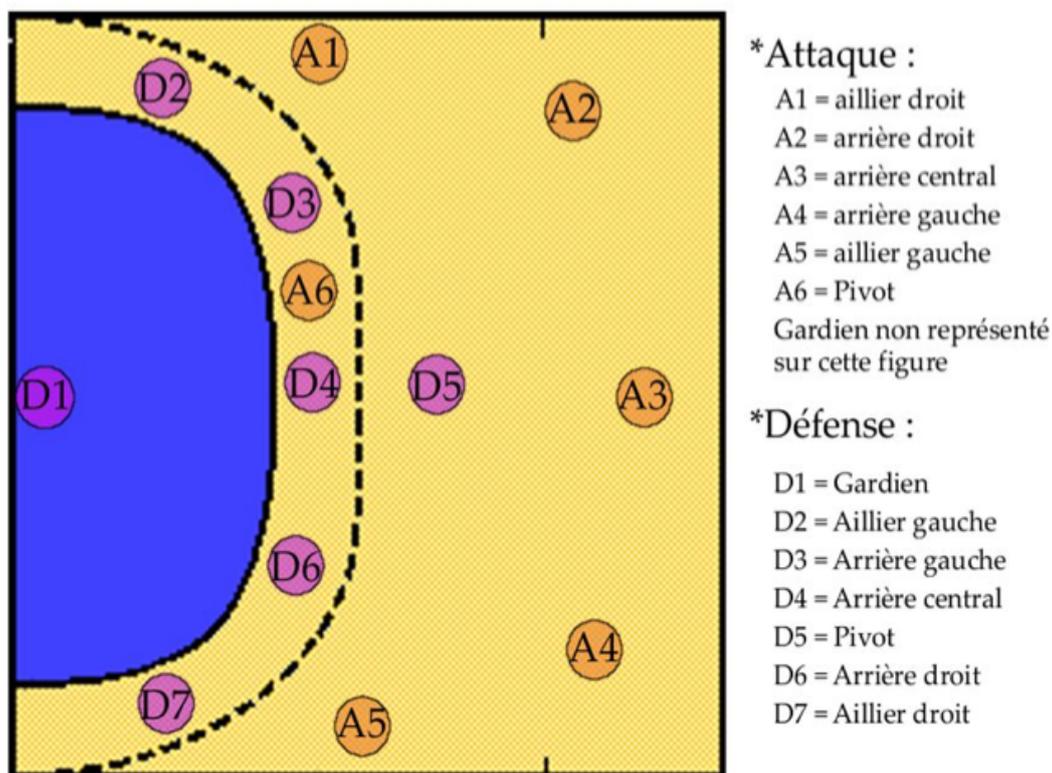


FIGURE 1.2 – Répartition des joueurs en fonction des postes de jeu.

La professionnalisation du handball, officiellement instaurée en 2007 en France, a entraîné une modification importante de l'architecture des compétitions nationales et internationales. L'augmentation du nombre de matchs ainsi que l'allongement de la durée de la période de compétition incite à une réflexion sur la gestion des joueurs à l'entraînement et en match. Les joueurs sont, en effet, de plus en plus sollicités et ont de moins en moins de temps pour se préparer. De plus, ils doivent faire face à de nombreuses sollicitations médiatiques imposées par leur clubs et fédérations respectives. Une réflexion autour du développement des qualités athlétiques est plus que jamais nécessaire. Afin d'aller plus loin dans cette réflexion, il convient de mieux comprendre les répercussions de telles contraintes et d'objectiver les adaptations physiques, physiologiques et psychologiques des joueurs de très haut niveau au cours d'une saison. Au regard de ces besoins, les études scientifiques sur le handball ont considérablement augmenté ces dernières années (Buchheit et al., 2009a; Cardinale et al., 2016; Chelly et al., 2011; Kruger et al., 2013; Luig et al., 2008; Manchado et al., 2013; Massuca et al., 2013; Michalsik et al., 2014, 2015a,b, 2016; Pers et al., 2002; Povoas et al., 2014; Sibila et al., 2004; Wagner et al., 2014). Dans leur revue de littérature, Ziv et Lidor (2009), et plus récemment Karcher et Buchheit (2014) estiment toutefois que les études sur le handball sont encore peu nombreuses, comparativement à d'autres sports comme le football ou le rugby. En mars 2018, le site PubMed indiquait approximativement 859 publications sur le handball, loin derrière le volleyball (1541), le basketball (3565), le football (10176), le soccer (8836) ou encore le

rugby (11020). Ces publications sur le handball regroupent le plus souvent trois grandes thématiques : (i) l'analyse de l'activité, en situation de matchs et d'entraînements, (ii) le profil physique et physiologique du joueur de handball (sénior hommes, sénior femmes et adolescents(es)) et (iii) le développement des qualités physiques. Parmi ces études, seules 3 (Bresciani et al., 2010; Gorostiaga et al., 2006; Granados et al., 2008) se sont intéressées aux effets de la pratique du handball à l'échelle d'une saison. C'est ce que nous avons cherché à faire dans le cadre de cette thèse. Nous avons étudié, sur l'ensemble d'une saison sportive, l'évolution de paramètres physiques et physiologiques, ainsi que des marqueurs perceptifs chez les joueurs professionnels de l'équipe du Montpellier Agglomération Handball (MAHB). Au moment de l'étude, la plupart des joueurs qui composaient cette équipe étaient des internationaux français ou étrangers. Pour rappel, ce club a le palmarès le plus prestigieux du handball français, avec 14 titres de Champions de France, 13 victoires en Coupes de France, 10 victoires en Coupes de la Ligue, 2 Trophées des Champions et 1 Ligue des Champions. Notre hypothèse de départ consistait à démontrer qu'une saison, comprenant de nombreux matchs et de nombreuses sessions d'entraînement, entraîne un stress important et que les joueurs professionnels accumulent de la fatigue physique et psychologique que nous avons cherché à mesurer et à expliquer. Dans un premier temps, nous avons étudié l'évolution du profil musculaire isocinétique des joueurs du MAHB (i) lors de la période pré-compétitive de préparation physique de début de saison mais également (ii) entre le début et la fin de la période compétitive. Dans un deuxième temps, nous avons étudié l'évolution de paramètres biologiques, physiologiques, physiques et psychologiques tout au long d'une saison sportive.

1.2 La locomotion du joueur de handball

Des informations pertinentes peuvent être collectées à partir d'observations et de mesures en conditions d'entraînement ou de match. Un certain nombre de travaux scientifiques se sont intéressés à l'activité handball. Certains de ces travaux se sont centrés plus particulièrement sur le profil physique et physiologique des joueurs (Buchheit et al., 2008; Chaouachi et al., 2009; Michalsik et al., 2015a; Povoas et al., 2012; Sporis et al., 2010; Wagner et al., 2014), d'autres sur les réponses physiologiques des joueurs (Buchheit et al., 2009b; Gorostiaga et al., 2006; Marques et Gonzalez-Badillo, 2006; Nikolaidis et Ingebrigsten, 2013; Sibila et al., 2004; Thorlund et al., 2008). Enfin, certaines études se sont intéressées à l'analyse de l'activité (Buchheit et al., 2008; Michalsik, 2004; Pers et al., 2002; Povoas et al., 2014; Sibila et al., 2004). Nous présenterons uniquement dans la partie suivante les résultats des études qui se sont intéressées à l'analyse de l'activité des joueurs de handball adultes.

1.2.1 Outils de mesure

Les premières tentatives d'analyse de l'activité physique (AP) datent des travaux de [Winterbottom \(1952\)](#), réalisés sur des joueurs de football professionnels anglais. C'est un des premiers auteurs à s'intéresser à l'analyse de l'activité au cours d'un match à partir d'une analyse notationnelle. L'intérêt de ce type d'analyse est de construire des critères d'efficacité autour de la performance des joueurs (Tableau 1.1). Pour autant, ce type d'analyse laisse le choix à l'observateur, ce qui rend subjective l'évaluation d'une action. [Reilly et Thomas \(1976\)](#) ont cherché à optimiser les méthodes d'analyse de la tâche en sports collectifs. Vingt-trois joueurs de football de première division anglaise participaient à cette étude. [Reilly et Thomas \(1976\)](#) utilisaient une reproduction du terrain codifiée par zone afin d'estimer les positions respectives et les distances parcourues par chacun des joueurs. Pour chaque joueur, chaque période d'activité était chronométrée, ce qui rendait l'analyse très longue et fastidieuse.

TABLEAU 1.1 – Exemple d'une analyse de suivi notationnelle ([Lacome et al., 2014](#)).

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.

Les progrès de l'informatique ont ensuite favorisé l'émergence de nouvelles méthodes d'analyse de l'activité des joueurs pendant un match. Les travaux de [Duthie et al. \(2005\)](#) et [Deutsch et al. \(2007\)](#), effectués sur des équipes de super 12 en rugby, ont permis, via l'analyse vidéo à partir de caméras (Panasonic MS-4, Matsushita Electronics, Japan) (Figure 1.3) et d'une interface vidéo spécifique (Pro-Log, Time Frame International, New Zealand), d'identifier chaque mouvement des joueurs sur le terrain.



FIGURE 1.3 – Caméra Panasonic MS-4.

La principale limite de ce type de mesure concerne la reproductibilité des données analysées. Duthie et al. (2005) ont étudié la reproductibilité de leur méthode sur 10 joueurs de rugby de Super 12. La vidéographie était analysée à 2 reprises par le même opérateur, à un mois d'intervalle. Les résultats ont montré une reproductibilité " modérée à faible " pour le calcul du temps total passé dans les différentes catégories d'intensité. Le nombre d'actions par catégories présentait une reproductibilité " faible à bonne " et la durée moyenne des mouvements par catégories présentait une reproductibilité modérée. Duthie et al. (2005) concluent logiquement que cette méthode d'analyse reste un outil d'évaluation modérément reproductible pour l'étude des déplacements du joueur de rugby. Elle présente toutefois l'avantage d'être peu coûteuse en matériel. Elle présente cependant deux inconvénients majeurs : un temps d'analyse très important et une reproductibilité modérée. Il existe d'autres systèmes d'analyse vidéo de l'activité sportive, plus classiques tels que Dartfish (Fribourg, Suisse) (Figure 1.4), Digital Soccer (Italy), Game Breaker (Sportstec, Australie) et Utilius VS (CCC-Software, Allemagne). Ces systèmes sont conçus pour apporter des informations techniques et tactiques aux entraîneurs et athlètes afin d'améliorer leurs performances. Ils ne sont toutefois pas appropriés à l'analyse scientifique de l'activité de handballeurs en situations de matchs et d'entraînements et ce tout au long d'une saison. Le recueil des données est là aussi beaucoup trop fastidieux.

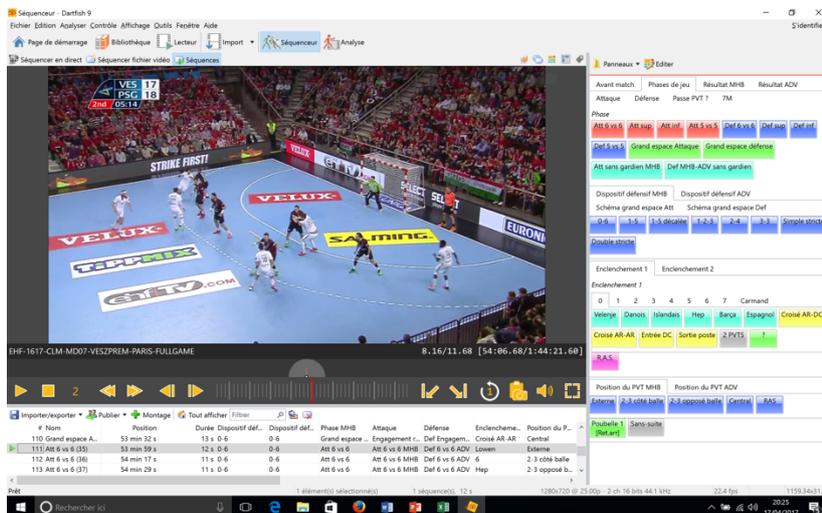


FIGURE 1.4 – Illustration de l'utilisation du système DARTFISH® au handball.

1.2.1.1 Les systèmes de suivi semi-automatique

L'analyse de suivi semi-automatique est un outil largement utilisé (Dawson et al., 2004; Roberts et al., 2008) pour décrire le nombre et la nature des actions en sport collectif. Les systèmes vidéo-informatisés de capture de mouvements sont utilisés afin de procéder à une analyse très fine de l'activité de sportifs en situations de matchs et d'entraînements. Il existe deux types de systèmes : les systèmes de capture en milieu extérieur et les systèmes de capture en milieu intérieur. Les systèmes utilisés en milieu extérieur diffèrent de ceux utilisés en milieu intérieur du fait de la plus grande surface de capture, d'une interaction plus grande entre les joueurs et de conditions d'éclairage variables (Barris et Button, 2008). Le plus souvent ces systèmes sont utilisés dans le domaine du football (Ekin et al., 2003; Figueroa et al., 2006; Taki et al., 1996) ou du rugby (Lacome et al., 2014). Les systèmes les plus utilisés sont les systèmes Amisco® (Sport universal process, Nice, France) (Figure 1.5) et Prozone® (Prozone, Leeds, Angleterre).



FIGURE 1.5 – Illustration du système Amisco®.

Ces systèmes permettent un suivi passif (sans marqueurs) des joueurs, grâce à plusieurs caméras installées autour d'un stade dont la fréquence d'acquisition est de 25 Hz. Le nombre et le positionnement des caméras dépendent de plusieurs facteurs tels que la dimension du terrain ou l'architecture du stade (hauteur de tribune et distance de la tribune par rapport au terrain). 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 (Figure 1.6). 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, et qu'ils se croisent, un phénomène d'occlusion émerge nécessitant une intervention humaine pour identifier à nouveau chaque joueur. Ce phénomène est fréquent en rugby en raison du nombre important de regroupements. Initialement, ces outils étaient destinés à l'analyse des matchs par l'encadrement technique. Ils n'étaient donc pas réellement validés scientifiquement. Zubillaga (2006) a réalisé une étude de fiabilité du système Amisco®, en comparant les données obtenues par le système Amisco® à celles obtenues à partir d'une analyse vidéo de sportifs courant autour d'une piste à différentes vitesses prédéfinies. Cet auteur montre une fiabilité importante du système pour la mesure des distances parcourues ($ICC = 0.998$; $P < 0.001$) ainsi que pour le calcul des vitesses ($ICC = 0.995$; $P < 0.001$). Valter et al. (2006) ont réalisé une étude de validation du système Prozone® en comparant les données collectées avec ce système à celles collectées avec des cellules photoélectriques. Les résultats de cette étude montrent que la vitesse moyenne, calculée à partir du système Prozone® lors de course de 15 à 60m, est fiable et reproductible ($ICC = 0.99$ et 0.95 respectivement; Erreur typique de mesure 0.2%). Ces deux systèmes semi-automatiques (Amisco® et Prozone®) semblent donc être des outils fiables et reproductibles, validés pour l'étude des déplacements de joueurs en match. **Dans le cadre de nos travaux, tous ces outils n'ont pas été retenus pour l'analyse de la locomotion des joueurs de handball. Ils demandent (i) une configuration spécifique dans le traitement des données ainsi (ii) qu'un investissement relativement coûteux.**

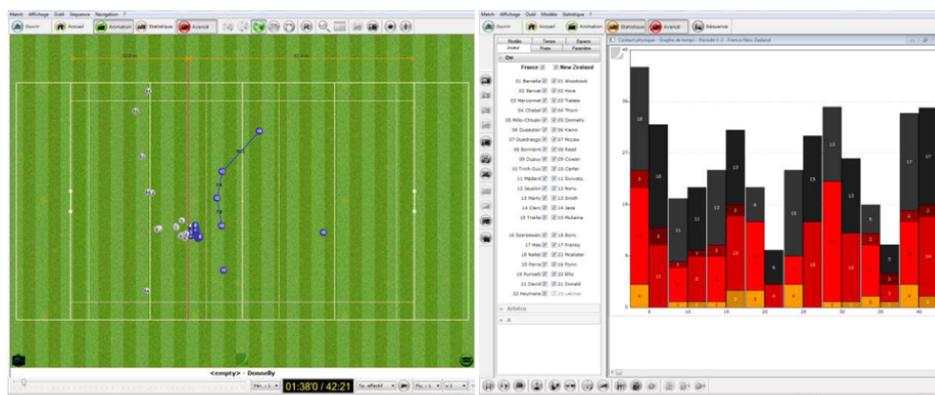


FIGURE 1.6 – Exemple d'utilisation du système Amisco®.

Il existe beaucoup moins de systèmes de capture utilisables à l'intérieur d'un gymnase (Pers et Kovacic, 2000a,b; Perse et al., 2005; Segen et Pingali, 1996). Le système de tracking vidéo SAGIT (Sagit system, Ljubjana, Slovénie) permet de mesurer l'activité de handballers en milieu fermé. A l'aide de 2 caméras placées à la verticale des 2 moitiés de terrain (Figure 1.7) et d'un logiciel de traitement des données, les joueurs sont suivis et analysés dans leur mode de déplacement pendant toute la durée d'un match.

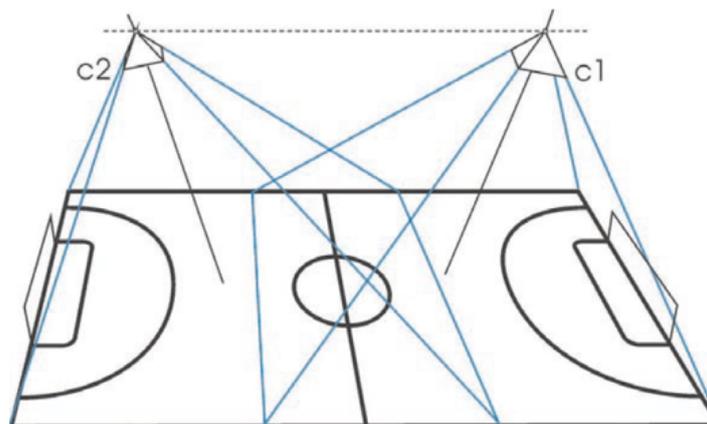


FIGURE 1.7 – Positionnement des 2 caméras du système SAGIT.

Créé par une entreprise américaine, et développé par Pers et collaborateurs à partir de 2002, ce système vidéo-informatisé a déjà été utilisé pour étudier l'activité de joueurs de handball (Chelly et al., 2011; Luig et al., 2008; Sibila et al., 2004). Il fournit des informations sur (i) la distance totale parcourue (DTP) par chaque joueur, (ii) leurs vitesses de déplacement, (iii) le rapport entre le temps d'effort et le temps de récupération ainsi que (iv) des informations sur le positionnement des joueurs (Figure 1.8). Toutefois, ce système n'est pas commercialisé et son utilisation à des fins scientifiques est extrêmement compliquée. **Nous avons opté pour ce système d'analyse, mais il nous a été impossible de collaborer avec l'équipe Slovène, détentrice de ce système, à cause de la complexité du recueil des informations et de la nécessité de se déplacer régulièrement en Slovénie afin d'analyser les données.**

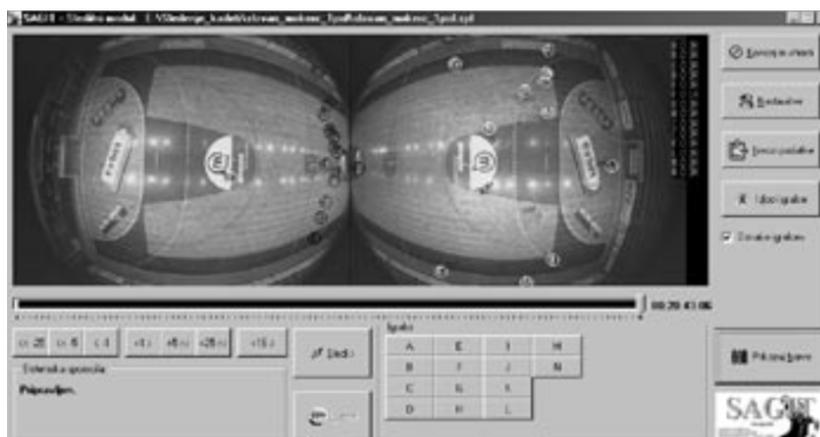


FIGURE 1.8 – Visuel de l'utilisation du système SAGIT.

Aux championnats du monde de handball, qui se sont déroulés au Qatar en 2015, un nouveau système a permis d'analyser 384 joueurs de 24 équipes nationales durant 88 matchs à l'aide d'un système de tracking video et du logiciel Prozone®Handball V.1.2 (Prozone, Leeds, Angleterre) adapté au milieu indoor (Cardinale et al., 2016). Le système

comprend 3 caméras indépendantes (Baumer TXG13c) qui suivent les trajectoires et les différents événements du match pour chacun des joueurs des 2 équipes présentes sur le terrain. Le logiciel d'analyse, (i) quantifie différentes variables de déplacement comme les accélérations, les décélérations, les changements de directions, DTP et (ii) les classes par zones d'intensités. Ce matériel est apparu après les expérimentations et n'a donc pas pu être utilisé dans le cadre de ce travail de recherche.

1.2.1.2 Les matériels portables

Les matériels portables représentent la solution la plus prisée pour réaliser la mesure de certains paramètres (e.g., cardiofréquencemètre, accéléromètres, podomètres, récepteurs géo-positionnement par satellites (GPS)). Les cardiofréquencemètres sont utilisés pour la mesure de fréquence cardiaque (FC), les accéléromètres pour la mesure de l'accélération et les récepteurs GPS pour le calcul de la position et de la vitesse. De plus, certains récepteurs GPS permettent aujourd'hui d'enregistrer la vitesse selon une fréquence d'échantillonnage suffisamment élevée pour caractériser l'accélération associée au déplacement lors de la course (Coutts et al., 2015).

Les accéléromètres

Une première approche de la quantification de l'AP consiste à utiliser un appareillage permettant de mesurer les déplacements du corps humain dans l'espace. Tous les mouvements du tronc et des membres induisent des accélérations qu'il est possible de mesurer par des capteurs appelés accéléromètres. Ils sont constitués d'un capteur comprenant une masse dite " sismique " qui bouge lors du mouvement. Ce capteur est calibré de telle sorte que l'amplitude du signal électrique lors du mouvement, générée suite à la perturbation de l'état électrique de référence du capteur, soit associée à une valeur d'accélération bien définie. Trois types de capteurs ont été utilisés jusqu'à présent dans les accéléromètres : les capteurs piézoélectriques, les capteurs piézorésistifs et les capteurs capacitifs (Chen et Bassett, 2005; Chen et al., 2012; Yang et Hsu, 2010). Les capteurs piézoélectriques ont été les premiers à être utilisés dans la conception des accéléromètres. Avec cette technologie, pour avoir une mesure de l'accélération dans trois axes, il fallait que l'accéléromètre comporte trois de ces capteurs disposés de manière orthogonale. Récemment, les accéléromètres utilisant un capteur capacitif sont devenus le type d'accéléromètre le plus utilisé en raison de leur facilité d'utilisation, de leur fiabilité et du fait qu'il ne soit pas nécessaire de calibrer le capteur en fonction des différentes conditions de température (Lowe et O'laighin, 2014) (Figure 1.9).

L'utilisation des accéléromètres dans le domaine de la recherche scientifique a été exponentielle depuis la fin des années quatre-vingt (Bassett et al., 2015). Aujourd'hui, les accéléromètres sont les capteurs de mouvement les plus utilisés pour l'évaluation de l'AP

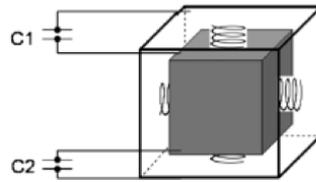


FIGURE 1.9 – Schéma d'un type de capteur capacitif utilisé par les accéléromètres.

(Chen et al., 2012). Ce sont des appareils petits, légers, portables, non invasifs et non intrusifs qui enregistrent le mouvement dans un ou plusieurs plans et qui fournissent des indications sur la fréquence, la durée et l'intensité de AP étudiée (Chen et Bassett, 2005; Corder et al., 2008; Kavanagh et Menz, 2008). Il existe plusieurs types d'accéléromètres : uni-axial, bi-axial et tri-axial (Figure 1.10). Les accéléromètres tri-axiaux ont l'avantage théorique de mesurer l'accélération dans les trois axes du corps, capturant ainsi une plus grande gamme de mouvements humains. Comparativement aux modèles uni-axiaux, ils fournissent une évaluation plus compréhensive des mouvements du corps (Butte et al., 2012). Toutefois, une de leurs limites est qu'ils ne fournissent pas de vitesses de déplacement. Des informations contextuelles doivent venir compléter cette mesure de AP (Rodriguez et al., 2005; Troped et al., 2008).

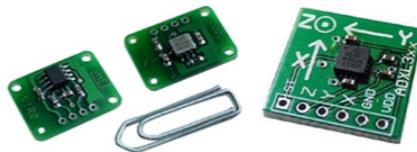


FIGURE 1.10 – Deux accéléromètres de type uni-axial à gauche et un accéléromètre de type tri-axial à droite.

Aujourd'hui, ces accéléromètres tri-axiaux peuvent mesurer et enregistrer l'accélération pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours ou plusieurs semaines selon la fréquence d'échantillonnage configurée (e.g., 30–100 Hz) et la capacité de mémoire de l'appareil (Plasqui et al., 2013; Trost et O'Neil, 2014). L'association de plusieurs de ces éléments électroniques aboutit au développement d'actimètres actuellement commercialisés (l'Actical®, l'Actiwatch® et le RT3®, (Figure 1.11). Les accélérations et décélérations enregistrées par les boîtiers, rendent compte de la fréquence et de l'intensité de l'effort physique produit par le corps étudié. Néanmoins, des imprécisions persistent lors d'une activité des bras ou du haut du corps. Les actimètres présentent des difficultés pour évaluer des mouvements lents et de faibles amplitudes, les algorithmes de calcul étant basés sur les activités de marche et de course (Bouten et al., 1994; Hendelman et al., 2000).

La reproductibilité des accéléromètres est sujette à des sources d'erreurs aléatoires d'origine technique (e.g., inconsistance dans la mesure du signal d'accélération et dans



FIGURE 1.11 – Plusieurs modèles d’actimètres. De gauche à droite : l’Actical® et l’Actiwatch® de type uni-axial, et le RT3® de type triaxial.

le traitement des données) et d’origine humaine (e.g., modification accidentelle de la position de l’appareil) (Pedisic et Bauman, 2015). La reproductibilité intra-unité des accéléromètres est relativement élevée, avec un coefficient de variation (CV) de la mesure qui approche environ les 3% sur un système mécanique (Ward et al., 2005). La reproductibilité inter-unités obtenue sur système mécanique est moins bonne que la reproductibilité intra-unité (Brage et al., 2003; Esliger et Tremblay, 2006; Pedisic et Bauman, 2015), mais le CV traduisant la différence de mesures entre plusieurs unités demeure relativement faible, avec des valeurs situées entre 5 et 10% (Esliger et Tremblay, 2006; Pedisic et Bauman, 2015). **Dans un sport collectif comme le handball, la complexité dans l’utilisation de ce type de capteurs réside dans les nombreux contacts rencontrés tout au long d’un entraînement ou d’un match. Cela exige de prendre certaines précautions lors de l’appareillage des joueurs avec ce type d’outil. Souvent positionnés dans le dos, sur la partie postérieure haute, les accéléromètres utilisés pourraient blesser un joueur lors d’un contact, comme pour un PvT qui prendrait position en reculant sur le défenseur adverse. Pour cette raison majeure, l’appareillage des joueurs avec ce type d’outil n’est pas autorisé lors des compétitions de handball.**

Les cardiofréquencemètres

La mesure de FC à l’aide d’un moniteur sans fil est possible depuis les années 1980. Ce moniteur utilise un transmetteur (i.e., des électrodes individuelles disposées sur la peau ou une ceinture élastique qui intègre les électrodes) qui peut être fixé au niveau de la poitrine et un récepteur (en général une montre) qui peut être porté au niveau du poignet (Achten et Jeukendrup, 2003) (Figure 1.12). Aujourd’hui, les moniteurs de FC sont les appareils de mesure de signaux physiologiques les plus communément utilisés pour évaluer l’AP (Chen et al., 2012), probablement en raison de leur faible coût et de leur facilité d’utilisation (Achten et Jeukendrup, 2003). Ils permettent l’enregistrement en continu de l’activité électrique du cœur d’un sujet pratiquant une AP. Ils permettent également de déterminer, pour une période donnée, la FC moyenne, la FC pic et le pourcentage de temps passé dans des zones de FC données. Cet appareillage a été validé par électrocardiogramme (ECG) en laboratoire (Gamelin et al., 2006; Karvonen et al., 1984; Treiber et al.,

1989) et offre l'avantage d'être portatif et peu invasif.



FIGURE 1.12 – Deux modèles de cardiofréquencemètre, dont le Polar RS 800® (à droite) muni d'une transmission infrarouge permettant l'exploitation des résultats par un logiciel informatique.

Seaward et al. (1990) n'ont pas trouvé de différence significative entre les valeurs de FC mesurées par le moniteur utilisé d'une part, et par ECG d'autre part, lors de la réalisation d'un panel d'activités qui incluait une phase de repos, et des AP d'une intensité qui allait de " légère " (dont la marche) à " maximale ". L'utilisation de FC lors d'un exercice physique permet d'estimer la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) du sujet. Ce parallèle est possible car au niveau cardio-vasculaire $\dot{V}O_2 = (FC \times \dot{V}_{es} \times (CaO_2 - C\bar{v}O_2))$, \dot{V}_{es} représente le volume d'éjection systolique ($ml.min^{-1}$), CaO_2 le contenu en O_2 du sang artériel ($ml.100ml^{-1}$) et $C\bar{v}O_2$ le contenu en O_2 du sang veineux ($ml.100ml^{-1}$) (Fick, 1870). De plus, il existe une relation linéaire entre FC et $\dot{V}O_2$ chez un individu soumis à un exercice de puissance croissante (Astrand et Ryhming, 1954). FC augmente linéairement avec l'intensité jusqu'à FC_{max} , et varie avec le niveau d'entraînement (Astrand et Ryhming, 1954). Plusieurs méthodes ont été développées dans la littérature pour traiter les données de FC et estimer la $\dot{V}O_2$ du sujet. La méthode communément admise consiste à prendre en compte l'équivalence existant entre le pourcentage de FC_{max} et le pourcentage de la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$). Cette relation montre une corrélation entre ces deux paramètres, indépendamment du sujet, de son sexe et de son niveau d'entraînement (Figure 1.13).

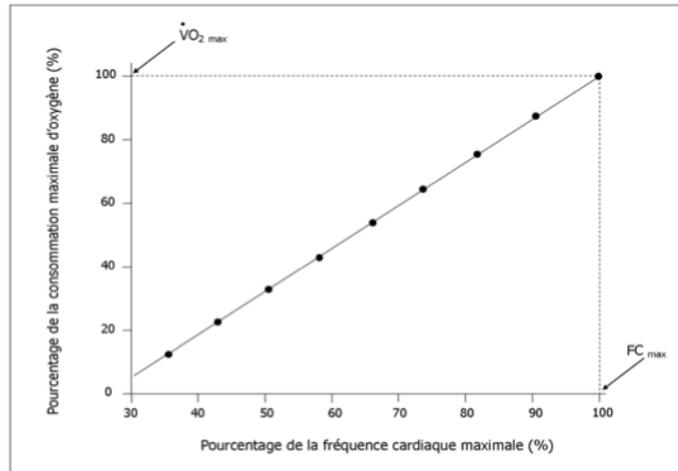


FIGURE 1.13 – Relation entre le pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$ et le pourcentage de FC_{max} .

Cette méthode permet d'établir une relation entre FC et $\dot{V}O_2$ à partir de la seule estimation de FC_{max} . La valeur de FC_{max} est estimée à partir de l'une des équations suivantes : $FC_{max} = 215 - 0.70 \times \text{âge}$ (Cooper et al., 1977) ; $FC_{max} = 210 - 0.65 \times \text{âge}$ (Spiro, 1977) ; $FC_{max} = 220 - \text{âge}$ (Fox et al., 1971). La valeur de $\dot{V}O_{2max}$ est ensuite estimée à partir des résultats d'un test sous-maximal à l'aide du nomogramme d'Astrand et Ryhming (1954) ou elle peut être déterminée à partir de FC (Figure 1.14).

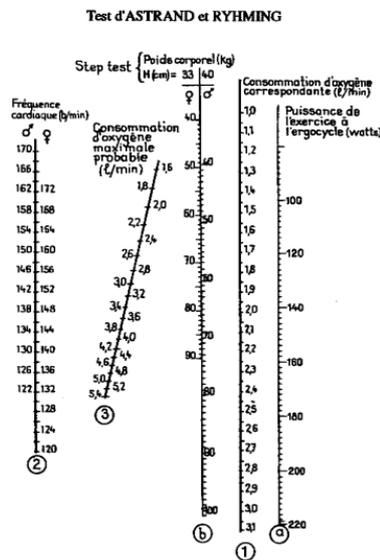


FIGURE 1.14 – Nomogramme d'Astrand et Ryhming (1954).

Cette méthode a pour avantage de pouvoir être utilisée sur une grande diversité de populations car elle ne nécessite que la réalisation d'un test sous maximal sur ergocycle. Néanmoins, cette relation n'est satisfaisante que dans une fourchette de valeurs moyennes de FC. Des imprécisions persistent pour des exercices de faibles et de hautes intensités. Dans leur revue de littérature, Achten et Jeukendrup (2003) montrent que l'utilisa-

tion d'un moniteur de FC s'est beaucoup généralisée dans le monde sportif amateur et professionnel. Sa fiabilité et sa précision, qui ne cessent de s'améliorer avec le temps, permettent d'avoir en temps réel une information sur les variations de la FC du sportif. Néanmoins, la réalisation préalable d'une épreuve d'effort avec mesure de la $\dot{V}O_2$ s'impose, à cause de la grande variabilité interindividuelle de FC. Pour les sports dont les efforts sont de type intermittent et d'intensité variable, la principale limite tient à l'inertie du système cardio-vasculaire qui induit une sous estimation de FC pour des efforts intenses dont la durée est inférieure à une trentaine de secondes. En outre, au-delà d'une intensité correspondant à $\dot{V}O_{2max}$, FC n'augmente plus, quelles que soient les intensités d'effort. De plus lorsque le niveau de fatigue s'élève, il est constaté une diminution importante des valeurs d'exercice (Bosquet et al., 2008). L'utilisation de FC ainsi que l'interprétation des résultats nécessitent également de prendre certaines précautions. En effet, une variation de la température ambiante, du stade émotionnel (stress), du statut d'hydratation, du type de contraction musculaire, de la taille et de la masse musculaire impliquée (Davidson et al., 1997; Montoye, 1996) peuvent induire une augmentation de FC, sans être accompagnée d'une augmentation de $\dot{V}O_2$. De plus, lors d'une phase de duel entre 2 joueurs, la vitesse est quasi nulle et la FC du handballeur est élevée car il fournit un effort très intense. Contrairement aux accéléromètres par exemple, les cardiofréquencemètres ne sont pas sensible au manque d'homogénéité qui peut exister entre des appareils de marques différentes dans la manière de mesurer, de filtrer, et de stocker les données (Chen et al., 2012).

Les systèmes GPS

Le GPS consiste à mesurer la position (X = latitude; Y = longitude; Z = altitude) et les déplacements sur la surface du globe terrestre en s'appuyant sur des informations envoyées par une constellation de satellites situés en orbite autour de la Terre. Les signaux provenant de l'espace représentent des données de position, de distance et de vitesse (Terrier et Schutz, 2005) et permettent au final de déterminer une localisation à n'importe quel moment et endroit de la terre, moyennant toutefois l'usage d'un récepteur capable d'utiliser les signaux envoyés par les satellites (Duquenne et al., 2005). 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, la position de la balise peut alors être connue par triangulation (Aughey, 2011; Larsson, 2003). Si le GPS consiste avant tout en une mesure du temps, l'une de ses utilisations principales est la détermination de la position sur la Terre. Il permet également de déterminer d'autres paramètres intéressants pour la navigation. Le GPS peut être utilisé pour calculer la position, la vi-

tesse de déplacement, la distance parcourue et la pente. La vitesse peut être calculée de deux manières : soit en divisant la distance parcourue entre deux positions par le temps mis pour parcourir cette distance; soit en utilisant la mesure du changement Doppler, ce qui est le cas pour la majorité des récepteurs GPS aujourd'hui. La distance peut également être calculée de deux manières : soit en effectuant une différence de positions; soit en multipliant la vitesse (Doppler) par la durée du déplacement. Quant à la pente, elle peut être obtenue en divisant la distance parcourue par la variation d'altitude correspondante. On remarque ainsi que la position et la vitesse (Doppler) sont les deux paramètres principaux que le GPS permet de calculer initialement. Compte tenu des variables principales qui peuvent être calculées grâce au GPS, on peut considérer qu'il existe deux grands types de précision associées à l'utilisation du GPS : la précision de l'estimation de la position et la précision de l'estimation de la vitesse (Le Faucheur et al., 2015). Ce type de précision peut être affecté par différentes sources d'erreur. Selon Wells et al. (1989) (In : (El-Rabanny, 2002)), il est possible de distinguer trois sources d'erreurs : i) les erreurs liées aux satellites; ii) les erreurs liées aux conditions atmosphériques; iii) et les erreurs liées au récepteur GPS utilisé. Au final, des appareils GPS de faible coût offrent une grande précision dans l'estimation des vitesses et des distances de déplacement en condition faiblement ou non "obstruée". Aussi, les récepteurs GPS du commerce sont aujourd'hui relativement petits et légers et peuvent être utilisés pour des mesures sans causer trop d'inconfort pour l'utilisateur et certains appareils offrent une interface minimale à l'utilisateur, lui laissant peu de possibilités d'interaction avec la mesure de l'appareil (Kerr et al., 2011). Le développement des balises dont la taille et la précision évoluent régulièrement, a permis, entre autre, de fournir des informations utiles sur le type et la vitesse de déplacement dans le milieu du sport. La diversité des actions en sport collectif rend complexe l'analyse des différents efforts composant les sessions de pratique (compétitions et entraînements). Les micro-technologies (en particulier les GPS) permettent de quantifier et de qualifier les différents déplacements et/ou actions lors des différentes séances. Hartwig et al. (2011) et Gabbett et al. (2012) ont utilisé cet outil pour analyser AP en rugby à XIII et à XV en compétition et à l'entraînement. Ils déterminent la distance parcourue à différentes vitesses, le nombre et l'intensité des impacts, les différentes vitesses en fonction des déplacements, le nombre et la durée des sprints et le pourcentage de temps passé dans différentes zones d'effort. Ces données permettent de comparer l'activité en compétition et à l'entraînement, et d'analyser les différences existantes en fonction des postes. Dans d'autres sports collectifs, comme le football, cette technologie est également utilisée pour quantifier les variables de déplacement, comme DTP, la distance parcourue à haute intensité ($> 14.4 km.h^{-1}$) ou à très haute intensité ($> 19.8 km.h^{-1}$) (Scott et al., 2013a). Toutefois, la technologie GPS présente un certain nombre d'inconvénients dont la complexité du recueil des données, le traitement et l'analyse de ces données ainsi que le coût

des appareils. De plus, lorsqu'il s'agit d'utiliser des outils technologiques dont la précision est très liée à l'évolution de la puissance des ordinateurs et à la complexité du matériel informatique, il convient d'être prudent. Plusieurs études récentes ont testé la validité du système GPS utilisé dans l'analyse de l'activité en sports collectifs (Coutts et Duffield, 2010; Johnston et al., 2012; Varley et al., 2012). L'utilisation du GPS dans le milieu sportif (Buchheit et Laursen, 2014; Castellano et al., 2011; Gomez-Piriz et al., 2011) montre que sa précision est fonction de la vitesse de course, de la distance parcourue, du caractère linéaire ou non linéaire des déplacements et surtout de la fréquence d'échantillonnage (Hz) des récepteurs utilisés. Coutts et Duffield (2010) montrent que les GPS dont la fréquence d'acquisition est 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 al. (2012) montre 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 al. (2012) confirment que la précision du système GPS dépend de la fréquence d'acquisition utilisée. Ces auteurs montrent que les GPS avec 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. Une étude de Castellano et al. (2011) montre, que sur une distance de 15m, les mesures faites par un GPS MinimaxX v4.0 (10 Hz) (Figure 1.15) (Catapult Innovations, Melbourne, Australie) s'échantillonnent de 11.1m à 14.9m.



FIGURE 1.15 – MinimaxX v4.0 S4.

Pour un test sur une distance de 30m les distances mesurées fluctuent de 26.1 à 30.3m. Compte tenu du type de déplacements retrouvés en sports collectifs, les données recueillies doivent être interprétées avec une grande précaution compte tenu des marges d'erreur (5 à 20%). Buchheit et Laursen (2014), en comparant différents modèles de GPS, incitent les utilisateurs de ces appareils à la plus grande vigilance, car les mesures des accélérations et des décélérations sont l'objet d'une grande variabilité. Cummins et al. (2013) ont réalisé une revue de littérature à partir de 35 études utilisant le GPS. A travers des données recueillies dans différentes disciplines (football australien, football, rugby à

XV, rugby à XIII, cricket, hockey, lacrosse et netball), ces auteurs montrent, qu'à part pour trois catégories d'activité du type "station debout", "marche" et "jogging", il n'existe pas de consensus inter-, ni intra-disciplinaire, concernant les zones de courses. Ils soulignent également que la validité du GPS augmente lorsque le volume de course est important et que la reproductibilité des données semble diminuer avec l'augmentation des courses à haute intensité ($> 20 \text{ km.h}^{-1}$). De plus, les systèmes GPS ont une utilisation limitée essentiellement à des activités de plein air avec un ciel visible (Butte et al., 2012). La précision dans l'estimation de la position, de la distance, mais aussi probablement de la vitesse de déplacement, est largement susceptible d'être dégradée lorsque des obstacles tels que des immeubles, des arbres, des reliefs montagneux, obstruent de manière prolongée la ligne directe entre le récepteur GPS et les satellites présents dans l'espace (Rainham et al., 2008). **Dans le cadre de nos travaux, la problématique liée à l'utilisation du GPS en milieu fermé (gymnase de handball) sans la possibilité de capter le signal émanant des satellites, ne nous permettait pas d'envisager son utilisation.**

Afin d'offrir des informations de plus en plus pertinentes, certains outils actuels proposent un couplage de différents capteurs. Ces appareils multi-capteurs sont assez répandue dans le domaine de la recherche, comme le modèle Armband®. Cet appareil a la particularité de mesurer plusieurs signaux physiologiques en même temps, à savoir : l'accélération (selon 2 axes), la réponse galvanique de la peau, et plusieurs variables de température, dont la température cutanée (Welk et al., 2000). Un autre outil, l'Actiheart® (Cambridge Neurotechnology Ltd, Papworth, UK), très léger (10 grammes), portable et imperméable à l'eau est capable de mesurer des accélérations et la FC du sujet (Figure 1.16).

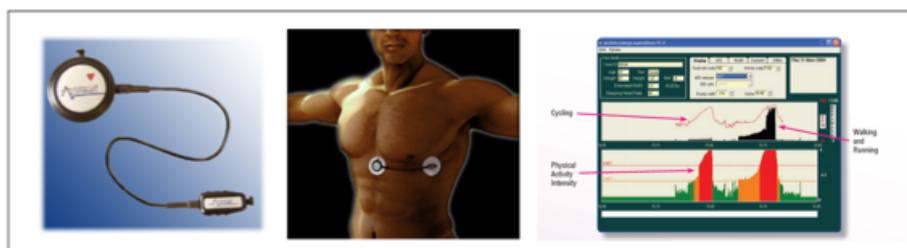


FIGURE 1.16 – L'actiheart®, son placement sur le sujet et son logiciel permettant de visualiser la dépense énergétique (DE) du sujet.

Le modèle Sense Wear Pro Armand®(Body Media, Pittsburgh, PA) est très utilisé pour la quantification de l'AP. C'est un système de monitoring léger et portable (80 g) qui se présente sous la forme d'un bracelet placé au niveau du triceps à mi-distance entre l'olécrane et l'acromion. A l'aide de nombreux capteurs (Figure 1.17), il permet de mesurer 21 paramètres (Fruin et Rankin, 2004), comme la température de la peau, le flux cutané (correspondant à la variation de la température cutanée à laquelle on soustrait la tempé-

rature extérieure), l'impédance de la peau et les mouvements grâce à un accéléromètre bi-axial. A partir de ces outils, certaines données seront exploitables comme la DE totale (exprimée en kcal), la durée de l'AP, de la DE active (en METs), le nombre de pas, du temps passé en position allongée et du temps de sommeil.

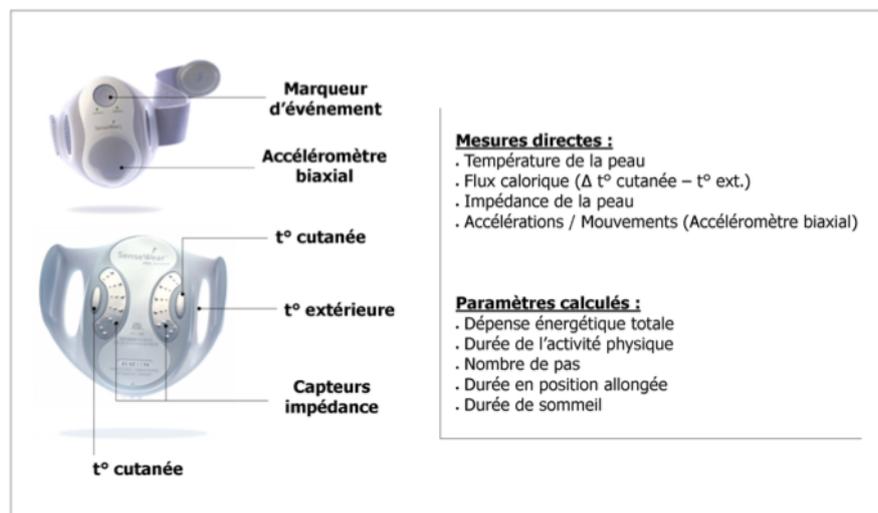


FIGURE 1.17 – Le Sensor Wear Pro Armband® et l'ensemble des paramètres mesurés.

D'autres appareils multi-capteurs ont été conçus ou sont en cours de développement pour être facilement et directement utilisables au quotidien afin de pouvoir quantifier l'AP. Ces appareils sont souvent désignés par l'expression activity trackers (Evenson et al., 2015). Ceux commercialisés par la compagnie FitBit® sont parmi les plus vendus. Les activity trackers de chez FitBit® peuvent se porter à différents endroits du corps selon le modèle. Ils contiennent, pour les plus récents, un accéléromètre tri-axial, un altimètre, un cardiofréquencemètre, et un récepteur GPS. Les appareils commercialisés par la compagnie Jawbone sont aussi parmi les plus populaires. Ils sont portés au poignet, et sont capables de mesurer l'accélération, l'impédance bioélectrique (pour estimer FC, les cycles respiratoires et les réponses cutanées), ainsi que la température ambiante et cutanée. Les appareils de chez FitBit® et Jawbone proposent de mesurer les pas, d'estimer des distances, et également d'estimer DE. **Toutefois de part leur configuration et leur placement sur le corps, tous ces capteurs ne sont pas adaptés à l'étude de la locomotion dans le cadre d'un sport de contact comme le handball.**

Une étude pilote (Troped et al., 2008) a montré un léger avantage à combiner l'utilisation du GPS avec celle des données accélérométriques pour classifier le type d'AP. Cette démarche d'analyse est très souvent intégrée dans les clubs sportifs professionnels (Brewer et al., 2010; Castellano et Casamichana, 2010; Macutkiewicz et Sunderland, 2011) afin de mieux comprendre l'activité des joueurs sur le terrain, permettant ainsi de quantifier précisément la charge d'entraînement externe (CE_{ext}), représentée par la mesure de

différentes variables, comme le nombre et l'intensité des déplacements, le tout en fonction des postes de jeu. Toutefois, une problématique demeure dans les sports de salle tel que le handball où les données quantitatives recueillies d'une manière scientifique pendant l'activité sont limitées par l'environnement fermé (gymnase) et par les nombreux contacts entre joueurs, limitant le port de matériel embarqué. Enfin, certaines technologies comme le vêtement capteurisé Hexoskin® (figure 1.18) apparaissent. Ces vêtements sont capables de monitorer divers paramètres physiques à l'aide d'accéléromètre et de gyroscope et physiologiques à l'aide de cardiofréquencemètre et de capteur capable de mesurer la fréquence respiratoire,.



FIGURE 1.18 – Tee-shirt Hexoskin® et son boîtier enregistreur (www.hexoskin.fr).

L'utilisation des systèmes présentés précédemment devrait permettre de mieux comprendre l'importance des exigences athlétiques du joueur de handball (Hasan et al., 2008). Dès que l'utilisation de ce type de matériel dépassera le cadre de la recherche expérimentale, les données pourront être traitées en direct pour évaluer l'état physique d'un joueur et favoriser la prise de décisions de l'entraîneur. Toutefois, le couplage de capteurs au sein du même dispositif augmente de manière importante le niveau de contrainte imposé à l'utilisateur, notamment dans le traitement des informations.

1.2.2 Etat de l'art

La possibilité de changer à volonté les joueurs de handball pendant un match est un élément clé de la gestion de l'effectif à l'échelle d'un match, mais également à l'échelle d'une saison. Des mesures effectuées pendant l'Euro de handball 2012 ont montré (i) que seulement 14% des joueurs passent plus de 75% du temps sur le terrain, (ii) que 25% d'entre eux passent entre 50 et 75% du temps sur le terrain, (iii) que 34% d'entre eux y passent entre 25 et 50% du temps et enfin (iv) que 28% d'entre eux passent moins de 25% du temps de jeu sur le terrain. [Karcher et Buchheit \(2014\)](#) ont analysé le nombre de rotations par match sur un ensemble de 7 matchs chez des joueurs de différentes nationalités évoluant en 1^{re} division. Les résultats de cette étude montrent que les ailier (AiL) effectuent environ 3 ± 2 rotations par match, les arrières latéraux (AL) 13 ± 9 et les PvT 27 ± 6 . Néanmoins, malgré ces possibilités de rotations, les auteurs rappellent qu'il est capital de mieux cerner les caractéristiques propres de l'activité handball, et ce, à tous les postes.

Le handball est régi par des règles qui peuvent arrêter les actions de jeu sans arrêter le chronomètre. Les principales études sur le temps de jeu effectif montrent une variation des valeurs comprises entre 32 et 53 min par joueur et par équipe ([Luig et al., 2008](#); [Michalsik et al., 2013](#)) avec des joueurs qui parcourent de 53 ± 7 à 90 ± 9 $m.min^{-1}$. Les travaux de [Luig et al. \(2008\)](#), menés lors de matchs officiels pendant les championnats du monde de 2007 en Allemagne, montrent un temps de jeu effectif de 37.37 ± 2.37 min pour les AiL, de 29.16 ± 1.70 min pour les AL, de 37.11 ± 3.28 min pour les GB et de 29.37 ± 2.70 min pour les PvT. Ces résultats sont en accord avec ceux de [Michalsik et al. \(2016\)](#) qui, lors des championnats d'Europe de 2016 en Pologne, montrent un temps total moyen de jeu de 38.40 ± 22.23 min. Ces données tiennent compte des temps morts techniques, des ballons perdus mais pas des mi-temps. Les valeurs en fonction des postes sont les suivantes : le temps de jeu effectif des AiL est de 50.46 ± 23.39 min, celui des AL de 34.27 ± 20.25 min, celui des PvT de 35.11 ± 20.65 min et enfin celui des GB de 42.60 ± 28.55 min.

1.2.2.1 Distance totale parcourue en fonction des postes, des types et de l'intensité des déplacements.

La première publication sur la locomotion du joueur de handball a été réalisée par [Konzag et Schacke \(1968\)](#). Ces auteurs montrent une DTP de 4152m, dont 3153m à un rythme moyen et 394m à un rythme rapide. [Garcia Cuesta \(1983\)](#) a étudié des joueurs espagnols dans le cadre de recherches menées pour la fédération Espagnole de handball lors des championnats du monde de 1982. Les résultats de cette étude montrent une DTP de 3464 ± 256 m pour les ALG, de 2857 ± 189 m pour les ALD, de 3557 ± 311 m pour les AiLG, de 4083 ± 286 m pour les AiLD et enfin de 2857 ± 145 m pour les PvT. Les travaux de [Cambel \(1985\)](#) permettent d'aller plus loin dans la description de l'activité en intégrant

un notion de vitesse dans les déplacements. Les résultats de cette étude montrent que 80% de DTP par les joueurs pendant un match se faisaient à $2m.s^{-1}$, 15% à des vitesses comprises entre 2 et $4 m.s^{-1}$, 5% à des vitesses comprises entre 4 et $8 m.s^{-1}$ et enfin 1% de DTP à des vitesses de 8 à $9 m.s^{-1}$. L'étude de [Martin \(1990\)](#) montre que les joueurs parcourent une DTP de 4700m à 5600m. Depuis une quinzaine d'années, les travaux qui se sont intéressés à la locomotion du joueur de handball se sont multipliés. La récente revue de littérature de [Ziv et Lidor \(2009\)](#) et plus récemment [Karcher et Buchheit \(2014\)](#) ont permis de faire une synthèse de la nature des déplacements du joueur de handball par poste de jeu (Figure 1.19).

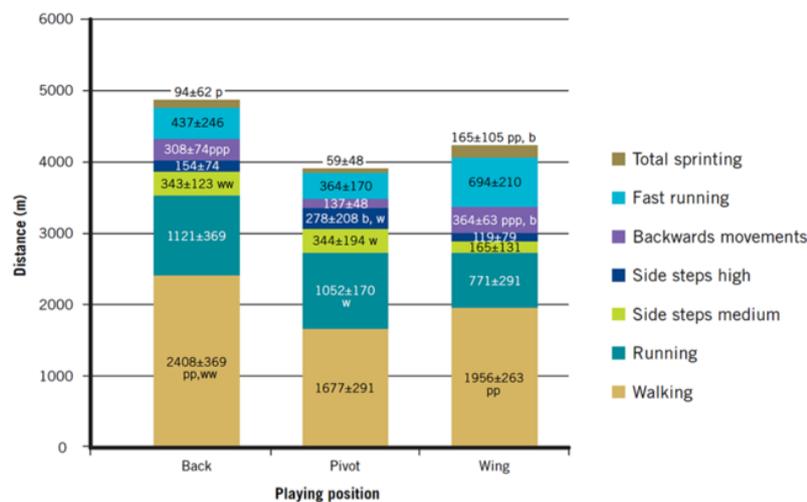


FIGURE 1.19 – Modalités de déplacement du joueur de handball ([Karcher et Buchheit, 2014](#)).

Back : Arrière; Wing : Ailier; Total sprinting : nombre total de sprint; Fast running : course rapide; Backwards movements : courses arrières; Side steps high : changement de directions à haute intensité; Side steps medium : changement de directions à intensité moyenne; Running : course; Walking : marche.

L'étude de [Al-Lail \(2001\)](#), réalisée à partir d'une analyse vidéo de joueurs de l'équipe nationale du koweït, montre que la distance moyenne parcourue par ces joueurs pendant un match est de $2478 \pm 224m$. Elle est répartie entre $620 \pm 88m$ de marche, $707 \pm 134m$ de course, $451 \pm 162m$ de sprint, $158 \pm 73m$ de course arrière et $540 \pm 123m$ de déplacements latéraux. Les travaux de [Sibila et al. \(2004\)](#), réalisés lors de matchs amicaux sur un ensemble de 12 équipes séniors Slovènes masculines à l'aide du système d'analyse vidéo SAGIT, montrent des différences significatives de DTP en fonction des postes de jeu (AL, AiL, PvT et GB). Dans leur étude, ces auteurs montrent que la plus grande DTP est couverte par les AiL (3855m), suivit des AL (3432m) et des PvT (3234m) tandis que les GB parcourent la distance la plus faible (1753m) (Figure 1.20). [Sibila et al. \(2004\)](#) ont également étudié le temps passé à certaines intensités de déplacements. 4 gamme de vitesse

ont été retenues par ces auteurs : la 1^{re} inférieure à 1.4 m.s^{-1} , la 2^e comprise entre 1.4 m.s^{-1} et 3.4 m.s^{-1} , la 3^e comprise entre 3.4 m.s^{-1} et 5.2 m.s^{-1} et la 4^e située au-dessus de 5.2 m.s^{-1} . Les résultats de cette étude montrent des différences significatives entre les groupes. Les GB passent 86% du temps total de jeu dans la première gamme de vitesse, les PvT 62% et les AiL 58%. S'agissant de la deuxième gamme de vitesse, les résultats de cette étude ne montrent pas de différences significatives entre les AL, les AiL et les PvT (autour de 15% du temps total). En revanche, les GB sont significativement différents des autres postes avec 11% du temps total passé dans cette deuxième gamme de vitesse. Le plus haut pourcentage de temps passé dans la troisième gamme de vitesse est observé chez les AiL (14%) et les AL (14%) mais sans différences significatives entre ces deux postes de jeu. Les PvT (10%) et les GB (2%) passent peu de temps à cette intensité. Enfin, concernant la 4^e gamme de vitesse, des différences significatives sont observées entre tous les postes de jeu. Les GB obtiennent cependant les résultats les plus faibles (0.5%). L'étude de [Sibila et al. \(2004\)](#) présente également les vitesses moyennes de déplacement des joueurs pendant les matchs : les plus rapides sont celles des AiL (1.60 m.s^{-1}), suivis des AL (1.43 m.s^{-1}), des PvT (1.34 m.s^{-1}) et des GB (0.73 m.s^{-1}).

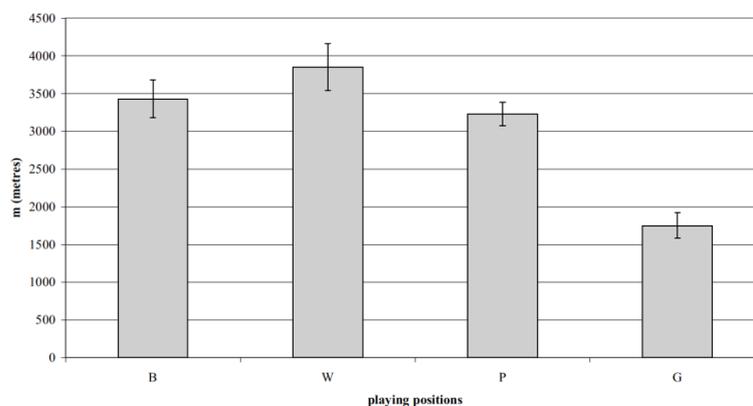


FIGURE 1.20 – Distance couverte par les joueurs selon les postes de jeu. B : AL ; W : AiL ; P : PvT ; G : GB ([Sibila et al., 2004](#)).

Par la suite, les travaux de [Luig et al. \(2008\)](#) ont permis, à l'aide du système SAGIT, d'analyser l'activité de 170 joueurs de handball pendant 9 matchs officiels lors des championnats du Monde de handball de 2007. Ces auteurs ont analysés les relations entre les postes de jeu et différentes intensités de déplacement telles que la marche ($< 1.49 \text{ m.s}^{-1}$), la course lente (1.5 à 3.99 m.s^{-1}), la course rapide (4 à 6.99 m.s^{-1}) et le sprint ($> 7 \text{ m.s}^{-1}$). Pour l'ensemble des joueurs, la marche représente $34.3 \pm 4.9\%$ du temps de match, la course lente $44.7 \pm 5.1\%$, la course rapide $17.9 \pm 3.5\%$ et le sprint $3.0 \pm 2.2\%$. La distance totale moyenne parcourue est de $2938.5 \pm 1403.9\text{m}$, avec $3710.6 \pm 210.2\text{m}$ pour

les AiL, $2839.9 \pm 150.6m$ pour les AL, $2786.9 \pm 238.8m$ pour les PvT et $2058.1 \pm 290.2m$ pour les GB. Comparativement aux autres joueurs, les AiL parcourent une distance significativement plus faible à des vitesses lentes mais significativement plus importante à des vitesses rapides et de type sprint. Il semble donc, à la lecture des résultats des deux précédentes études, que le poste d’AiL soit celui où la distance parcourue et l’intensité des déplacements soient les plus importantes. Plus récemment, l’étude de Povoas et al. (2012) menée lors de 10 matchs officiels du championnat national portugais, montre que la DTP moyenne pendant un match est de $4370 \pm 702m$, avec $0.4 \pm 0.31\%$ du temps de jeu effectif consacré au sprint, $35 \pm 6.94\%$ consacré à de la marche et $43 \pm 9.27\%$ dans une position d’attente debout (Figure 1.21). Les résultats de cette étude montrent également que les 5 premières minutes de la première mi-temps comprennent la plus grande part d’actions à hautes intensités et que les 5 premières minutes de la deuxième mi-temps en comprennent le moins. Povoas et al. (2012) montrent également que ces actions à haute intensité sont plus nombreuses en défense qu’en attaque, tout comme le nombre de situation de 1 vs 1 (8.2 en attaque vs 12.1 en défense).

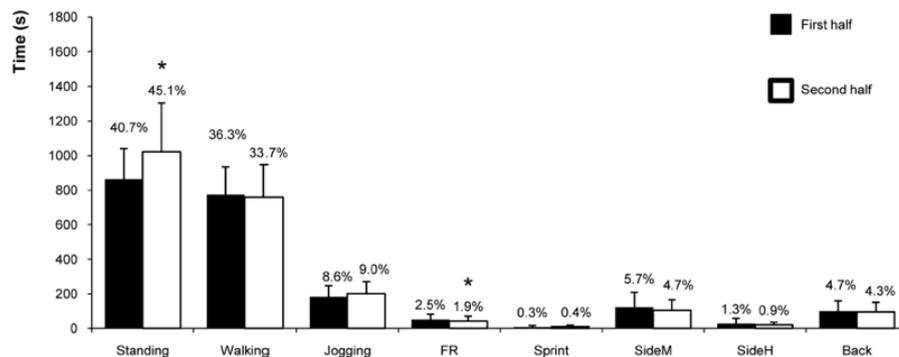


FIGURE 1.21 – Répartition des distances en fonction du temps (Michalsik et al., 2013).

sideM : changement de direction à intensité modérée; sideH : idem à intensité élevée.

Michalsik (2011), montre, chez des joueurs Danois de 1^{re} ligue, que $7.9 \pm 4.9\%$ du temps total de course correspond à de la course rapide et que $1.7 \pm 0.9\%$ du temps total de course correspond à du sprint. Michalsik et al. (2013), toujours chez des joueurs Danois de première ligue, montrent à l’aide de caméras positionnées sur le côté du terrain (une caméra dédiée par joueur), que DTP moyenne pendant un match est de $3627 \pm 568m$ (avec une moyenne de vitesse de déplacement de $6.40 \pm 1.01 km.h^{-1}$) répartis selon différentes intensités (marche, course, sprint). Les résultats de cette étude montrent que les AiL parcourent $3641 \pm 501m$, les AL $3765 \pm 532m$ et les PvT $3295 \pm 495m$ et que les actions défensives et offensives correspondent à une distance totale moyenne très semblable ($1781 \pm 337m$ vs $1846 \pm 346m$). Ces auteurs indiquent également que les joueurs de champs sont en mouvement pendant plus de 60% du temps total de jeu. Corvino et al.

(2014) ont analysé chez des joueurs amateurs slovènes les DTP et les intensités de déplacements sur différentes configurations de jeux réduits, à savoir 24m de long x 12m de large, 30m x 15m et enfin 32m x 16m. A l'aide de capteurs GPS munis d'accéléromètres, les auteurs ont mesuré les DTP par les joueurs dans 4 zones de vitesses de déplacement ($< 1.4 \text{ m.s}^{-1}$; $1.4\text{--}3.4 \text{ m.s}^{-1}$; $3.4\text{--}5.2 \text{ m.s}^{-1}$; $> 5.2 \text{ m.s}^{-1}$). Leurs résultats montrent que les DTP varient en fonction de la surface de jeu : $885.2 \pm 66.6 \text{ m}$ pour l'aire de jeu de 24m de long x 12m de large, $980 \pm 73.4 \text{ m}$ pour celle de 30m x 15m et $1095 \pm 112.9 \text{ m}$ pour celle de 32m x 16m. Les résultats de cette étude montrent également que les plus grandes DTP le sont dans les zones 2 et 3, i.e., entre 1.4 et 5.2 m.s^{-1} . En exprimant les DTP par min, les résultats de cette étude montrent enfin que les joueurs parcourent 110.7 m.min^{-1} sur la surface de 24 x 12m, 122.5 m.min^{-1} sur celle de 30 x 15m et 136.9 m.min^{-1} sur la surface de 32 x 16m. A titre de comparaison avec une surface de jeu normalisée pour l'activité de 40m x 20m, Bon (2001) retrouve des valeurs de 79.8 m.min^{-1} et Pori et al. (2009) des valeurs de 87.5 m.min^{-1} . L'étude de Michalsik et al. (2015a) s'est intéressée à la répartition des distances par tranche de 5 min sur l'ensemble d'un match. Les résultats de cette étude montrent que les joueurs effectuent de moins en moins de distance au fur et à mesure de la 1^{re} mi-temps. Les résultats de la 2^e mi-temps montrent des valeurs plus basses qu'en 1^{re} mi-temps, avec cependant une hausse dans les 10 dernières minutes du match. Ceci peut s'expliquer par la notion de " money-time ", souvent décisif en sport collectif qui amène les joueurs à s'investir totalement pour remporter le match (Figure 1.22).

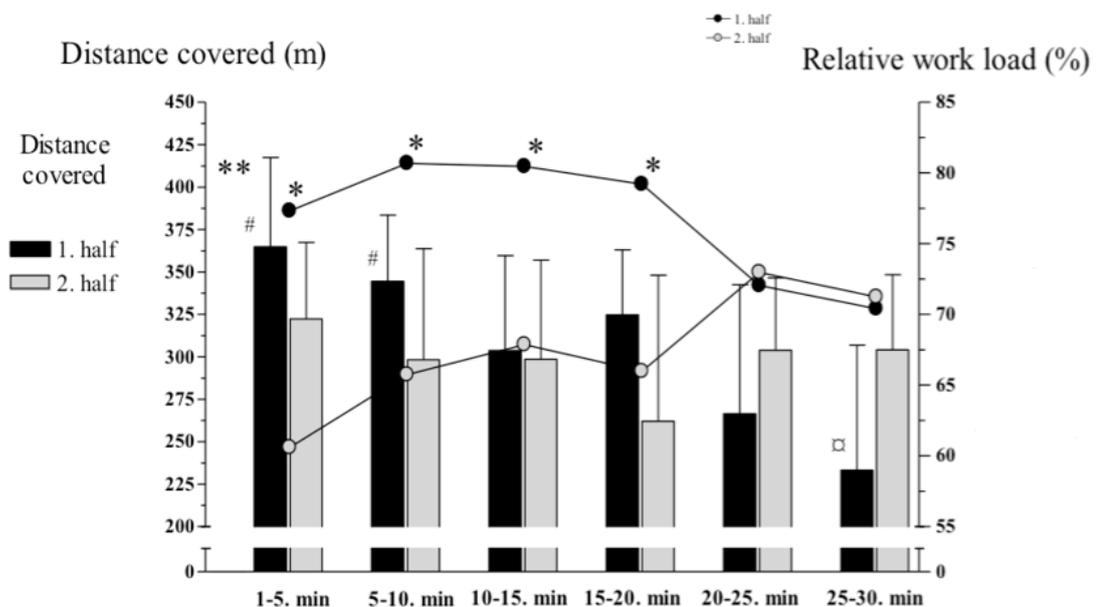


FIGURE 1.22 – Répartition des zones de déplacement en fonction d'un match (Michalsik et al., 2015a).

Povoas et al. (2014) ont analysé l'activité des joueurs professionnels d'une équipe de handball Portugaise sur un total de 10 rencontres officielles. Ces auteurs ont étudié le

nombre d'actions réalisées par poste (Tableau 1.2) ainsi que le type de déplacements. Huit modes de déplacements étaient étudiés : la position debout en attente, les pas chassés à moyenne et haute intensité, la course arrière, la marche, le jogging, la course rapide et le sprint. Les résultats de cette étude montrent que DTP moyenne pendant un match est de $4440 \pm 702\text{m}$. Ils montrent également la répartition suivante : $1939 \pm 237\text{m}$ sont réalisés à une allure de marche par les AiL ($46.2 \pm 6.2\%$ de DTP), $2385 \pm 306\text{m}$ par les AL ($48.5 \pm 7.1\%$ de DTP) et $1681 \pm 396\text{m}$ par les PvT ($42.9 \pm 7.7\%$ de DTP). $768 \pm 122\text{m}$ sont réalisés à une allure de footing par les AiL ($18.2 \pm 2.1\%$ de DTP), $1225 \pm 433\text{m}$ par les AL ($24.6 \pm 7.3\%$ de DTP) et $1049 \pm 203\text{m}$ par les PvT ($26.9 \pm 4.2\%$ de DTP). $702 \pm 262\text{m}$ ($16.4 \pm 5.2\%$ de DTP) sont réalisés à allure rapide par les AiL, $461 \pm 282\text{m}$ par les AL ($8.8 \pm 4.6\%$ de DTP) et $362 \pm 183\text{m}$ par les PvT ($9.3 \pm 4.3\%$ de DTP). Enfin, les AiL parcourent $168 \pm 102\text{m}$ ($3.9 \pm 2.4\%$ de DTP) à une allure de sprint, $97 \pm 69\text{m}$ ($1.9 \pm 1.3\%$ de DTP) pour les AL et $57 \pm 49\text{m}$ ($1.5 \pm 1.4\%$ de DTP) pour les PvT. Cette étude met une nouvelle fois en évidence l'importance des DTP à intensités élevées par les ailiers. Mais elle montre également que DTP par les AL est importante.

TABLEAU 1.2 – Répartition des actions selon les postes de jeu (Povoas et al., 2014).

	Sauts	Tirs	Contacts	Changements de direction	1 vs 1
AiL	8.2 ± 2.9	4.3 ± 1.8	19.1 ± 6.9	18.4 ± 6.7	5.6 ± 2.3
AL	19.1 ± 5.2	10.3 ± 4.4	38.2 ± 9.2	37.9 ± 9.2	18.9 ± 6.6
PvT	14 ± 3.9	5.4 ± 2.1	36.8 ± 11.1	35.4 ± 11.1	36.4 ± 16.2

Plus récemment, d'autres travaux se sont intéressés à la locomotion des joueurs de handball. Michalsik et al. (2016), analysent grâce au nouveau système d'analyse vidéo Prozone®, adapté au milieu indoor, l'activité de joueurs de handball au cours des championnats d'Europe de 2016 en Pologne. Les résultats de cette étude montrent que DTP moyenne de ces joueurs est de $2915 \pm 1662\text{m}$. Les AiL parcourent $3987 \pm 1778\text{m}$, les AL $2574 \pm 1491\text{m}$, les PvT $2562 \pm 1363\text{m}$ et les GB $1550 \pm 1077\text{m}$. Cardinale et al. (2016) ont analysé les championnats du monde de handball au Qatar en 2015 avec le même système. Ces auteurs montrent que DTP moyenne des joueurs pendant un match est de $2607.5 \pm 1438.4\text{m}$. Les AiLG parcourent $3339.20 \pm 640\text{m}$, les AiLD $3403.5 \pm 1602.8\text{m}$, les ALG $2410.9 \pm 137.7\text{m}$, les ALD $2586.8 \pm 1414.3\text{m}$, les DC $2698.7 \pm 1188.9\text{m}$ et les PvT $2419 \pm 1225.2\text{m}$. Ces deux études renforcent l'idée selon laquelle les AiL parcourent une distance plus importante que les joueurs des autres postes (Figure 1.23). En revanche, aucune différence significative n'est observée entre les équipes du haut de classement et celles du bas de classement final. Au travers de ces différentes études nous pouvons constater une certaine variabilité des résultats retrouvés. L'utilisation de différents systèmes d'analyses, l'hétérogénéité des différents niveaux de jeu analysés ou les postes de jeu pris en compte

dans les résultats peuvent en partie expliquer ces différences de résultats. C'est le cas avec les travaux de [Thorlund et al. \(2008\)](#) qui montrent, lors d'un match amical d'une équipe Danoise de première ligue, des valeurs plus importantes que la plupart des autres études. Les résultats montrent une DTP à 6527.20m, dont 265.30m de marche, 2781.45m de jogging, 594.30m de course modérée, 401.25m de course rapide, 247m de sprint, 265.30m de course arrière, 890.40m de mouvements antéro-postérieurs, 274.40m de mouvements latéraux et 598.50m d'accélération en relation avec une feinte et une impulsion.

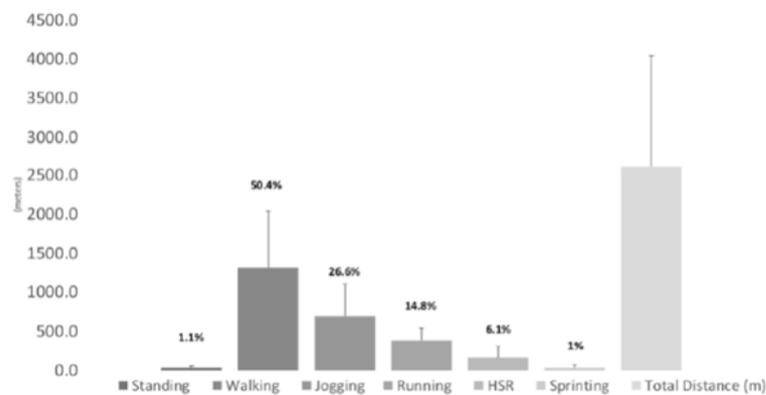


FIGURE 1.23 – Répartition moyenne des intensités de déplacements du joueur de handball ([Cardinale et al., 2016](#)).

Standing : Position debout ; Walking : Marche ; Jogging : Course à faible intensité ; Running : Course à intensité moyenne ; HSR : Course à haute intensité, Sprinting : Course à très haute intensité ; Total Distance : Distance totale.

DTP et le temps passé dans les différentes zones de vitesse restent donc des éléments importants pour affiner les exigences par postes de jeu et adapter plus précisément les contenus d'entraînement.

L'intérêt consisterait à déterminer une zone optimale de sollicitation par joueur en fonction des données recueillies lors des matchs et des entraînements.

TABLEAU 1.3 – Récapitulatif des distances parcourues.

Références	Sujets / niveau	Postes de jeu	DTP	Type de déplacement	
Konzag et Schacke (1968)			4152m		
			3153m	Rythme moyen	
			394m	Rythme rapide	
Garcia Cuesta (1983)	Championnats du monde 1982	ALG	3464 ± 256m		
		ALD	2857 ± 189m		
		AiLG	3557 ± 311m		
		AiLD	4083 ± 286m		
		PvT	2857 ± 145m		
Al-Lail (2001)	Equipe nationale Koweït		2478 ± 224m		
			620 ± 88m	Sprint	
			158 ± 73m	Course arrière	
			540 ± 123m	Déplacements latéraux	
Sibila et al. (2004)	12 équipes séniors Slovènes	AiL	3855m		
		AL	3432m		
		PvT	3234m		
		GB	1753m		
Luig et al. (2008)	170 joueurs de handball, Mondial 2007		2938 ± 1403.9m		
			AiL	3710 ± 210.2m	
			AL	2786.8 ± 238.8m	
			GB	2058.1 ± 290.2m	

Suite sur la page suivante

TABLEAU 1.3 – Suite de la page précédente.

Références	Sujets / niveau	Postes de jeu	DTP	Type de déplacement
Povoas et al. (2012)	Championnat national portugais		4370 ± 702m	
				0.4 ± 0.31% sprint
				35 ± 6.94% marche
				43 ± 9.27% position attente debout
Michalsik et al. (2013)	Première ligue Danoise		3627 ± 568m	
		AiL	3461 ± 501m	
		AL	3765 ± 532m	
		PvT	3295 ± 495m	
Povoas et al. (2014)	Equipe Portugaise		4440 ± 702m	
		AiL	1939 ± 237m	Marche
		AL	2385 ± 306m	Marche
		PvT	1681 ± 396m	Marche
		AiL	768 ± 122m	Footing
		AL	1225 ± 433m	Footing
		PvT	1049 ± 203m	Footing
		AiL	702 ± 262m	Allure rapide
		AL	461 ± 282m	Allure rapide
		PvT	362 ± 283m	Allure rapide
		AiL	168 ± 102m	Allure sprint
		AL	97 ± 69m	Allure sprint
		PvT	57 ± 49m	Allure sprint

Suite sur la page suivante

TABLEAU 1.3 – Suite de la page précédente.

Références	Sujets / niveau	Postes de jeu	DTP	Type de déplacement
Michalsik et al. (2016)	Championnat d'Europe 2016		2915 ± 1662m	
		AiL	3987 ± 1778m	
		AL	2574 ± 1491m	
		PvT	2562 ± 1363m	
		GB	1550 ± 1077m	
Cardinale et al. (2016)	Championnats du monde 2015		2607.5 ± 1438.4m	
		AiLG	3339.2 ± 640m	
		AiLD	3403.5 ± 1602.8m	
		ALG	2410.9 ± 137.7m	
		ALD	2586.8 ± 1413.3m	
		DC	2698.7 ± 1188.9m	
		PvT	2419 ± 1225.2m	
Thorlund et al. (2008)	Match amical Danois 1 ligue		6527.20 ± 265.3m	
			265.3m	Marche
			2781.45m	Jogging
			594.3m	Course modérée
			401.25m	Course rapide
			247m	Sprint
			265.3m	Course arrière
			890.4m	Mouvements antéro-postérieurs
			274.4m	Mouvements latéraux

1.2.2.2 Actions de hautes intensités : nature, fréquence et durée.

L'analyse de la locomotion des joueurs de handball ne peut toutefois se limiter à l'analyse des distances parcourues. De part sa caractéristique intermittente et la densité importante des joueurs sur un espace de jeu restreint, le handball demande l'enchaînement de nombreuses actions explosives, telles que des sauts, des sprints, des duels offensifs et défensifs, des tirs et des changements de directions. Michalsik (2011) dénombre environ 350 actions par match, dont 36.9 ± 13.1 actions techniques intenses (1 vs 1, accélérations...). L'enchaînement de ces phases à haute intensité fait appel à la capacité des joueurs à changer de rythme, c'est à dire à accélérer et décélérer. Les travaux de Di Prampero et al. (2005) permettent de mieux comprendre l'impact de ces accélérations, équivalentes en termes de sollicitation métabolique à celles rencontrées lors d'une course à vitesse constante sur un terrain en pente. Ces accélérations induisent donc un cout métabolique important à prendre en considération dans l'analyse de la locomotion des joueurs dans les sports collectifs (Dubois et al., 2017). De plus, même si le caractère aléatoire des temps de récupération entre ces accélérations ne permet pas d'envisager sereinement une programmation d'entraînement (Karcher et Buchheit, 2014; Michalsik et al., 2015b; Povoas et al., 2012), elles représentent les aspects déterminants d'un match et contribuent à la performance de l'équipe (Figure 1.24).

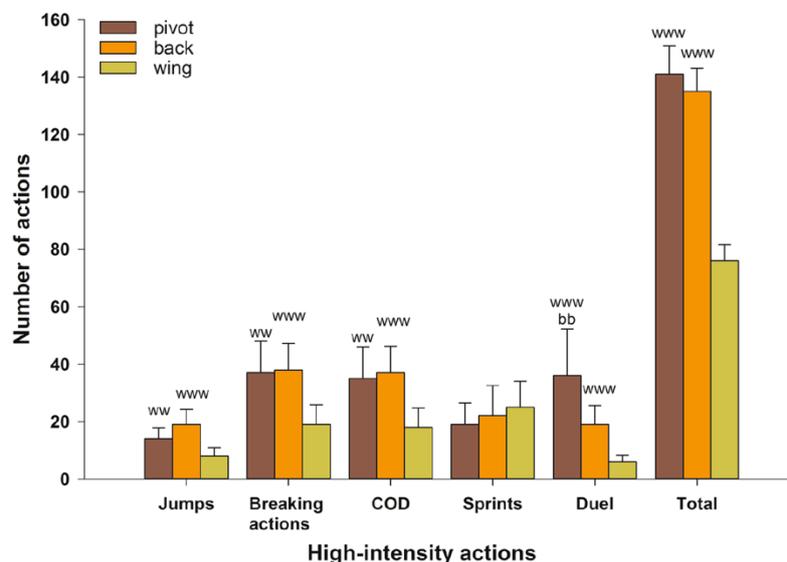


FIGURE 1.24 – Répartition des actions à haute intensité (Karcher et Buchheit, 2014).

Jumps : Sauts ; Breaking actions : Actions décisives ; Sprints : Course à haute intensité ; COD : Changements de directions.

Thorlund et al. (2008) montrent, au cours d'un match de 1^{re} ligue Danoise, que les déplacements antéro-postérieurs des joueurs correspondent à 890.40m, les changements

de direction à 274.40m et les accélérations en lien avec une feinte ou une impulsion à 598.50m. [Povoas et al. \(2012\)](#) sont les premiers à mettre en relation, pendant différentes phases de jeu et sur un match complet, des actions spécifiques (saut, tir, arrêt brusque, changement de direction, 1 vs 1), des intensités de déplacement (arrêt, marche, course lente, course rapide, sprint, course arrière, déplacements latéraux d'intensité moyenne, déplacements latéraux de haute intensité) et des réponses physiologiques (FC). Les résultats de cette étude montrent que les actions à haute intensité correspondent à $798 \pm 370.1m$ et que les actions à basse intensité correspondent à $3571 \pm 658.2m$. Les mêmes auteurs en 2014, étudient 10 matchs de ligue professionnelle Portugaise comprenant une trentaine de joueurs. Les résultats de cette étude montrent que le nombre d'actions à haute intensité est supérieur lors des phases défensives par rapport aux phases offensives. Ils montrent également que le PvT s'illustre dans un grand nombre d'actions intenses, deux fois plus qu'un AiL, sans toutefois effectuer de grands déplacements. En dehors du nombre important de mouvements latéraux à haute intensité et du temps consacré aux courses arrière, le PvT se retrouve fréquemment en phase de duels puisqu'il se situe au cœur du système défensif là où les attaques sont les plus fréquentes.

Une autre façon de s'intéresser aux actions explosives du handballeur consiste à mesurer leur durée et le temps qui les sépare. Peu d'études traitent de la récupération entre les différents types d'effort lors d'un match de handball. Une première étude de [Mohamed et al. \(2009\)](#) s'est intéressée au mode de répétition des efforts du handballeur. Ces auteurs font apparaître chez des joueurs des efforts de basses intensités intercalés entre des actions de haute intensité. Les résultats de cette étude montrent (i) un temps moyen de récupération de 55 ± 32 sec, avec (ii) une grande variation de ces temps de récupération, et (iii) un mode de répétition plutôt aléatoire. Plus récemment, l'étude de [Povoas et al. \(2012\)](#), réalisée sur des joueurs de handball Portugais, montre également que $63 \pm 25\%$ des actions, représentées par des sprints et des courses rapides, sont entrecoupées de plus de 90 s de récupération. Par rapport aux postes de jeu, les résultats de cette étude montrent également que les actions de sprint et de courses rapides représentent $67 \pm 22\%$ des actions chez les AL, $63 \pm 18\%$ chez les AiL et $57 \pm 24\%$ chez les PvT. Ils montrent enfin que $9 \pm 8\%$ de ces actions intenses sont séparées par 61 à 90 s de récupération, $11 \pm 12\%$ par 31 à 60 s et $18 \pm 18\%$ par moins de 30 s de récupération. Concernant l'enchaînement d'actions de haute intensité répétées en moins de 30 s, les AL en effectuent $18 \pm 16\%$, les AiL $13 \pm 13\%$ et les PvT $19 \pm 17\%$ (Figure 1.25). Les résultats de [Povoas et al. \(2012\)](#) n'ont pas permis de constater de différences significatives de ces valeurs de récupération en fonction des postes de jeu. Au travers de ces résultats, on s'aperçoit que la répartition des phases de récupération, dans sa durée et sa fréquence, est difficile à appréhender lors d'un match de handball de part la nature aléatoire de l'activité.

En conclusion, malgré les nombreuses études qui se sont intéressées à l'analyse de

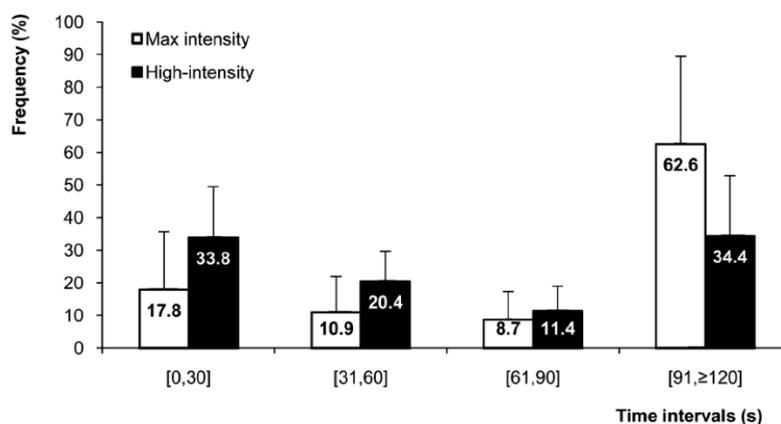


FIGURE 1.25 – Fréquence de distribution entre les actions à intensité maximale et celles à haute intensité (Povoas et al., 2012).

l'activité en handball, peu d'études ont procédé à une analyse sur des joueurs de handball de très haut niveau sur une saison complète en considérant à la fois les matchs et les entraînements. La plupart de ces études utilisaient une technologie différente pour procéder à l'analyse de l'activité des handballeurs et à ce jour seulement une étude (Wilk et al., 2009), chez des joueuses de handball, a utilisé un système embarqué (accéléromètre tri-axial couplé avec un gyroscope) contrairement à d'autres disciplines sportives comme le tennis (Reid et al., 2008), le rugby (Coutts et al., 2007; Edgecomb et Norton, 2006), le football (Casamichana et al., 2013; Gomez-Piriz et al., 2011), le football Australien (Scott et al., 2013a) et le cricket (Elliott et Adlerson, 2007) où l'utilisation de ces outils est plus courante.

Comme l'ont montré certains auteurs (Gorostiaga et al., 2006; Granados et al., 2008), lorsque les outils technologiques permettant de quantifier la charge d'entraînement sont inaccessibles, on se contente de compter le nombre de minutes passés à l'entraînement ainsi que la nature de cet entraînement, c'est également ce que nous avons fait dans le cadre de ce travail.

1.3 Profil anthropométrique du joueur de handball

1.3.1 Outils de mesure

L'anthropométrie est une technique universellement applicable, bon marché et non invasive, qui permet d'évaluer la corpulence, les proportions et la composition du corps humain (Organisation Mondiale de la Santé). Le profil anthropométrique regroupe les notions de taille, de masse totale, de rapport entre la masse grasseuse et la masse musculaire, de taux d'hydratation ou d'autres données selon les outils utilisés. L'analyse de cette composition corporelle peut-être réalisée à partir de différentes méthodes. Selon les ob-

jectifs recherchés, on utilise soit la méthode des plis cutanés (Durnin et Rahaman, 1967), soit l'impédancemétrie (Segal, 1996) ou encore l'imagerie médicale (DEXA) (Duthie et al., 2005).

1.3.2 Etat de l'art

Le profil anthropométrique est un élément clé de la performance en handball. Les travaux de Khosla (1983) montrent que les joueurs appartenant aux équipes qui gagnent des titres sont plus grands que les autres. Ils montrent l'importance de la taille pour jouer au plus haut niveau en handball. Les nombreux contacts entre les joueurs (Povoas et al., 2012) nécessitent en effet des gabarits imposants (Sibila et al., 2004), surtout chez les AL et les PvT. Hasan et al. (2008), lors des jeux asiatiques de 1994, ont étudié la taille des joueurs asiatiques (Chine, Japon, Corée, Koweït et Arabie Saoudite). Concernant la taille des joueurs Asiatiques, les résultats montrent que les GB et les AL sont plus grands que les autres joueurs de l'équipe (respectivement $1.865 \pm 0.044\text{m}$ pour les GB, $1.858 \pm 0.047\text{m}$ pour les AL), en comparaison avec les PvT ($1.837 \pm 0.024\text{m}$) et les AiL ($1.842 \pm 0.055\text{m}$). Ces résultats sont en accord avec ceux de Chaouachi et al. (2009) qui montrent que la taille des AL est plus importante ($1.93 \pm 0,032\text{m}$) que celles des PvT ($1.92 \pm 0,072\text{m}$), des GB ($1.89 \pm 0,02\text{m}$) et des AiL ($1.82 \pm 0,048\text{m}$). Sporis et al. (2010) montrent également chez des joueurs Croates de première division, que (i) les joueurs les plus petits ($183.9 \pm 5.7\text{ cm}$) occupent le poste d'AiL et (ii) et que les joueurs les plus grands ($196.7 \pm 5.4\text{ cm}$) occupent les postes d'AL. Ces résultats vont dans le sens des exigences du jeu qui demandent aux AL de s'élever parfois au dessus des défenseurs pour tirer et aux AiL d'être plutôt racé lors des phases de courses rapides ou de sprints.

S'agissant de la masse corporelle, l'étude de Srhoj et al. (2002) montre, chez des joueurs Danois de 1^{re} division, que la masse des AL est de 94.28kg, que celle des PvT est de 92.58kg, et que celles des GB et des AiL sont respectivement de 91.79kg et de 85.12kg. Les résultats de l'étude de Hasan et al. (2008) montrent que les PvT sont plus lourds ($84.7 \pm 8.9\text{kg}$) et plus "gras" ($10.8 \pm 3.3\%$) que les joueurs occupant les autres postes. Les travaux de Chaouachi et al. (2009) vont dans le même sens. Ils confirment l'importance de la masse corporelle au poste de PvT ($98.2 \pm 12.9\text{kg}$) afin de mieux résister aux pressions importantes des défenseurs, comparativement aux AiL ($84.1 \pm 5.9\text{kg}$), aux AL ($88.0 \pm 8.0\text{kg}$) et aux GB ($91.5 \pm 6.8\text{kg}$). Pour Kruger et al. (2013), les GB doivent posséder une densité corporelle importante afin de couvrir de façon optimale la surface du but. Ces constatations vont dans le sens des modes de compétition actuels en handball qui amènent les joueurs vers des profils anthropométrique spécifiques (Povoas, 2009). Le temps passé à l'entraînement, de plus en plus important, et les processus de préparation physique tendent à répondre à l'évolution des sollicitations du jeu (Ghobadi et al., 2013). Les résultats pré-

sentés précédemment attestent qu'il existe un profil type du joueur de handball en fonction de son poste de jeu (Povoas, 2009). Au delà de ces postes de jeu et de leurs spécificités anthropométriques, Gorostiaga et al. (2004) étudient la relation entre le profil anthropométrique et le niveau de jeu. Les auteurs montrent que les joueurs élites, comparativement à des joueurs amateurs, sont significativement plus grands (188.7 ± 8 cm vs 183.8 ± 7 cm), plus lourds (95.2 ± 9 kg vs 82.4 ± 10 kg), malgré un pourcentage de masse grasse plus important ($13.8 \pm 2\%$ vs $11.8 \pm 3\%$). Ces auteurs concluent que les joueurs de handball évoluant au niveau élite sont devenus plus "corpulents" au cours des deux dernières décennies, et que cette augmentation de la masse corporelle est liée à la professionnalisation du handball. De leur côté, Deng et al. (1990) suggèrent que les joueurs de handball chinois devraient être plus musclés, plus forts et plus grands pour pouvoir rivaliser avec les autres nations. Massuca et Fragoso (2015), à partir d'une étude réalisée chez 160 joueurs évoluant de la 1^{re} à la 4^e division portugaise, montrent qu'une morphologie optimisée, propre à chaque poste et à chaque niveau de jeu, est nécessaire pour obtenir des succès en handball. Ghobadi et al. (2013) établissent un lien important entre le profil anthropométrique des équipes participant aux championnats du monde de 2013 (Espagne) et le classement final (Tableau 1.4). Les auteurs montrent l'importance du gabarit type pour espérer atteindre les premières places. Les équipes européennes (qui "trustent" régulièrement les titres continentaux) sont, en effet, plus grandes (192.37 ± 6.69 cm) et plus lourdes (94.69 ± 9.86 kg) que les équipes des autres continents. Ces caractéristiques sont très intéressantes au regard des déterminants de la performance en handball (Wagner et al., 2014) (Figure 1.26) pour la plupart des postes de jeu.

Malgré l'importance d'avoir des gabarits adaptés à cette pratique, le handball demande des habiletés techniques et tactiques très élaborées, uniquement développées par la répétition des savoir-faire techniques et ce durant plusieurs années de pratique. D'autres analyses doivent être conduites et on peut se demander si le joueur de handball peut et doit se résumer à un profil type. La figure 1.26 semble montrer que non, tellement les composantes de la performance en handball sont nombreuses. De plus, même si Carter (1984) montre que les joueurs de handball peuvent être classés comme endomorphe, il serait réducteur de "limiter" les handballeurs à un "morphotype", décrit à l'origine par les travaux de Sheldon (1950).

TABEAU 1.4 – Caractéristiques anthropométriques réparties en fonction du classement final (moyenne ± SD) (Ghobadi et al., 2013).

	n	Age (ans)	Taille (cm)	Poids du corps (kg)	Indice Masse ($kg.m^{-2}$)
G1	68	27.70 ± 4.10	193.22 ± 7.75	95.74 ± 10.92	25.59 ± 2.05
G2	64	28.22 ± 4.11	192.50 ± 6.38	94.52 ± 9.92	25.46 ± 1.98
G3	70	26.93 ± 4.59	192.03 ± 6.22†	92.73 ± 8.62	25.12 ± 1.74
G4	68	26.60 ± 4.08	189.41 ± 5.83†§	93.37 ± 10.23	25.98 ± 2.21
G5	70	26.60 ± 4.12	186.46 ± 5.69†*	89.16 ± 8.51†*	25.66 ± 2.37
G6	69	25.83 ± 4.23*	187.23 ± 5.96†*	88.96 ± 8.73†*	25.36 ± 2.06

G1 : équipes classées de la 1^{re} à la 4^e place; G2 : équipes classées de la 5^e à la 8^e place; G3 : équipes classées de la 9^e à la 12^e place; G4 : équipes classées de la 13^e à la 16^e place; G5 : équipes classées de la 17^e à la 20^e place; G6 : équipes classées de la 21^e à la 24^e place.

† : différence significative avec G1; * : différence significative avec G2; § : différence significative avec G5 ‡ : différence significative avec G5 et G6.

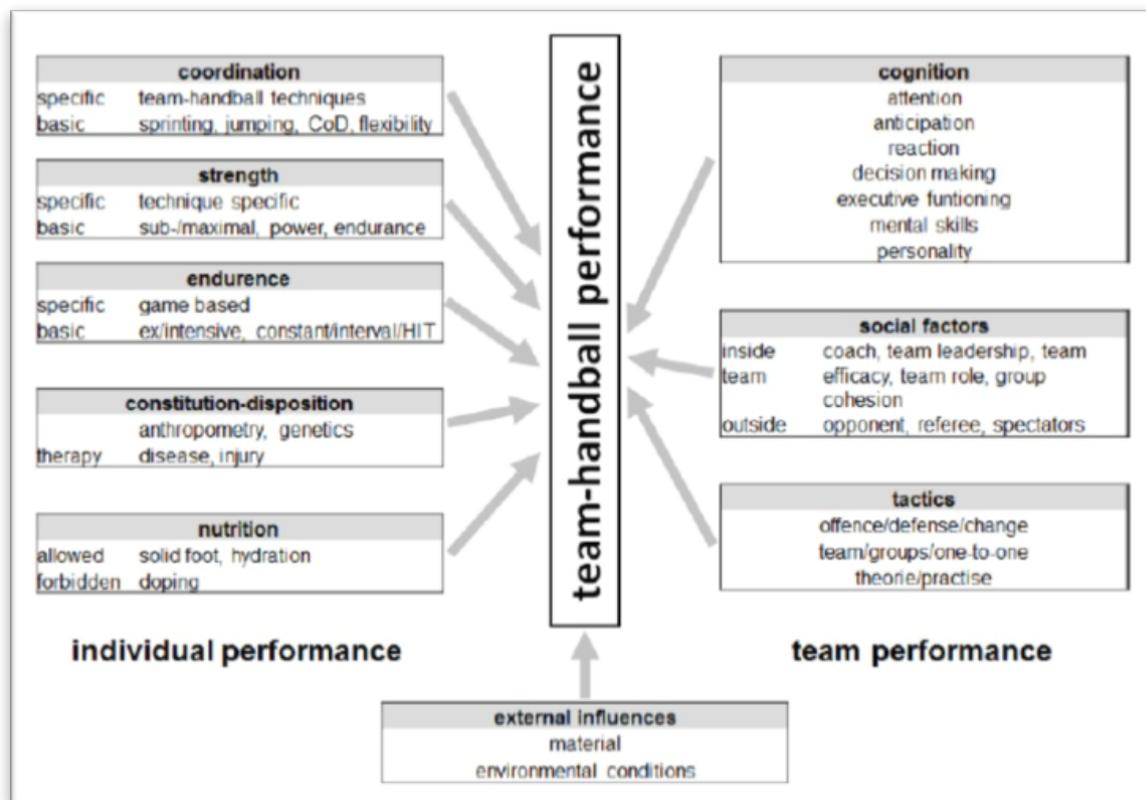


FIGURE 1.26 – Déterminants de la performance en handball (Wagner et al., 2014).

TABLEAU 1.5 – Récapitulatif des caractéristiques anthropométriques.

Références	Sujets / niveau	Postes de jeu	Age (ans)	Taille (cm)	Masse totale (kg)	Masse grasse (%)
Ramadan et Hassan (1999)	n=15 Nation Koweit	tous postes	ND	179 ± 2.0	85.8 ± 3.2	11.5 ± 2.0
Rannou et al. (2001)	n=10 National	NA	22.7 ± 0.6	177.4 ± 1.4	74 ± 2.0	13.2 ± 0.9
Bayios et al. (2001)	n=7 International	NA	23.9 ± 1.2	190 ± 1.2	79.4 ± 0.8	12 ± 0.4
	n=15 D1 Grèce	tous postes	ND	181 ± 6.0	83.1 ± 5.2	ND
		tous postes AiL	ND	190.79 ± 6.59 187.02 ± NA	91.29 ± 7.57 85.12 ± NA	ND ND
Srhoj et al. (2002)	n=49	AL	ND	194.42 ± NA	94.28 ± NA	ND
	Nat Croatie	PvT	ND	183.85 ± NA	92.58 ± NA	ND
		GB	ND	191.86 ± NA	91.79 ± NA	ND
Van Den Tillar et Ettema (2004)	n=20 D2-D3 Norvège	tous postes	24.7 ± 2.3	184.8 ± 8.2	84.7 ± 10.0	16.7 ± 3.2
Gorostiaga et al. (2005)	n=15 Elite Espagne	tous postes	31 ± 3.0	188.7 ± 8.0	95.2 ± 13.0	13.8 ± 2.0
Marques et Gonzalez-Badillo (2006)	n=16 Ht N Espagne	tous postes	23.1 ± 4.7	184.2 ± 13.1	84.8 ± 13.1	ND
Hasan et al. (2008)		tous postes	25 ± 3.1	183.2 ± 7.0	82.2 ± 9.6	11 ± 3.6
	n=63	GB	25 ± 1.9	186.5 ± 4.4	80.8 ± 7.0	10.5 ± 3.3

Suite sur la page suivante

TABLEAU 1.5 – Suite de la page précédente.

Références	Sujets / niveau	Postes de jeu	Age (ans)	Taille (cm)	Masse totale (kg)	Masse grasse (%)
	Jeux asiatiques	AL	24 ± 1.5	185.8 ± 4.7	82.5 ± 5.0	10.5 ± 1.7
		PvT	26 ± 1.9	183.7 ± 2.4	84.7 ± 8.9	10.8 ± 3.3
		AiL	25 ± 0.8	184.2 ± 5.5	81.6 ± 7.4	10.4 ± 2.6
	n=8	NA	20 ± 2.0	174.2 ± 5.4	77.5 ± 11.5	13.4 ± 5.1
	D1 Angleterre					
Thorlund et al. (2008)	n=10	NA	22.8 ± 1.5	188.4 ± 2.7	91.7 ± 3.0	10.6 ± 1.2
	D1 Danemark					
Chaouachi et al. (2009)	International Tunisie					
	n=4	GB	26 ± 2.5	189 ± 2.0	91.5 ± 6.8	20.2 ± 1.4
	n=9	AL	23 ± 1.2	193 ± 3.20	88.0 ± 8.0	12.4 ± 3.3
	n=3	PvT	24 ± 2.3	192 ± 7.2	98.2 ± 12.9	13.4 ± 2.6
	n=5	AiL	23 ± 1.6	182 ± 4.8	84.1 ± 5.9	15.1 ± 2.8
	n=92	tous postes	26.4 ± 3.8	192.1 ± 8.2	96.0 ± 8.3	11.2 ± 3.4
Sporis et al. (2010)	D1 Croatie					
	n=13	GB	28.6 ± 5.0	195.2 ± 5.2	100.0 ± 8.8	12.7 ± 0.6
	n=26	AiL	25.3 ± 4.2	183.9 ± 5.7	89.1 ± 6.5	13.2 ± 3.3
	n=28	AL	26.2 ± 3.7	196.7 ± 5.4	96.7 ± 5.4	8.7 ± 2.0
	n=25	PvT	28.2 ± 0.9	196.3 ± 9.3	107.6 ± 7.9	13.3 ± 6.2
Povoas et al. (2012)	n=30	NA	25.2 ± 3.59	186.5 ± 7.92	87.7 ± 8.96	9.7 ± 2.25
	D1 Portugal					

Suite sur la page suivante

TABLEAU 1.5 – Suite de la page précédente.

Références	Sujets / niveau	Postes de jeu	Age (ans)	Taille (cm)	Masse totale (kg)	Masse grasse (%)
Ghobadi et al. (2013)	Championnats du Monde 2013					
	n=409	tous postes	26.86 ± 4.24	190.1 ± 6.82	26.86 ± 4.24	ND
	n=16	tous postes	28.19 ± 4.0	192.8 ± 7.60	96.88 ± 11.23	ND
	R1 Espagne					
	n=17	tous postes	27.47 ± 4.5	194.0 ± 7.51	94.82 ± 10.37	ND
	R2 Danemark					
	n=18	tous postes	25.89 ± 3.7	194.39 ± 8.99	96.72 ± 12.64	ND
	R3 Croatie					
	n=17	tous postes	26.88 ± 4.1	191.53 ± 7.08	94.53 ± 9.97	ND
	R4 Slovénie					
n=16	tous postes	27.0 ± 3.36	193.44 ± 4.81	92.19 ± 6.37	ND	
R5 Allemagne						
n=16	tous postes	29.44 ± 5.3	191.0 ± 6.54	92.69 ± 9.74	ND	
R6 France						
n=16	tous postes	28.56 ± 3.9	192.12 ± 7.91	96.44 ± 12.79	ND	
R7 Russie						
n=16	tous postes	27.88 ± 3.5	193.44 ± 6.15	96.75 ± 9.78	ND	
R8 Hongrie						
n=18	tous postes	28.89 ± 3.8	193.94 ± 6.86	93.00 ± 9.62	ND	
R9 Pologne						
n=18	tous postes	26.28 ± 4.9	191.56 ± 6.73	94.56 ± 9.42	ND	
R10 Serbie						

Suite sur la page suivante

TABLEAU 1.5 – Suite de la page précédente.

Références	Sujets / niveau	Postes de jeu	Age (ans)	Taille (cm)	Masse totale (kg)	Masse grasse (%)
	n=17	tous postes	24.76 ± 4.2	190.71 ± 5.58	90.76 ± 8.80	ND
	R11 Tunisie					
	n=17	tous postes	27.71 ± 4.4	191.82 ± 5.59	92.47 ± 6.53	ND
	R12 Islande					
	n=16	tous postes	25.62 ± 3.7	190.19 ± 4.91	95.12 ± 7.63	ND
	R13 Brésil					
	n=17	tous postes	28.82 ± 3.6	189.53 ± 4.92	92.65 ± 9.58	ND
	R14 Macédoine					
	n=17	tous postes	27.24 ± 4.0	193.41 ± 6.03	95.82 ± 11.01	ND
	R15 Biélorussie					
	n=18	tous postes	24.78 ± 3.9	184.83 ± 4.12	90.17 ± 11.84	ND
	R16 Egypte					
	n=17	tous postes	27.18 ± 4.3	188.12 ± 3.21	88.65 ± 4.83	ND
	R17 Algérie					
	n=18	tous postes	25.89 ± 3.3	188.56 ± 5.86	90.00 ± 8.17	ND
	R18 Argentine					
	n=18	tous postes	26.61 ± 4.4	183.72 ± 6.25	90.00 ± 8.67	ND
	R19 Arabie Saoudie					
	n=17	tous postes	26.76 ± 4.5	185.47 ± 5.83	87.88 ± 11.59	ND
	R20 Qatar					
	n=18	tous postes	26.22 ± 3.8	186.72 ± 4.56	85.22 ± 7.76	ND
	R21 Corée du Sud					

Suite sur la page suivante

TABLEAU 1.5 – Suite de la page précédente.

Références	Sujets / niveau	Postes de jeu	Age (ans)	Taille (cm)	Masse totale (kg)	Masse grasse (%)
	n=17	tous postes	28.35 ± 4.8	190.06 ± 5.83	96.18 ± 8.39	ND
	R22 Monténégro					
	n=18	tous postes	24.78 ± 3.7	186.00 ± 6.04	88.94 ± 6.85	ND
	R23 Chilie					
	n=16	tous postes	23.88 ± 3.3	186.19 ± 6.89	85.50 ± 7.79	ND
	R24 Australie					
	n=55	GB	28.82 ± 4.8	191.89 ± 5.18	95.60 ± 10.45	ND
	n=135	AL	26.40 ± 4.2	192.62 ± 6.65	94.17 ± 8.20	ND
	n=55	DC	26.09 ± 3.9	188.05 ± 5.96	89.42 ± 8.12	ND
	n=97	AiL	26.45 ± 3.8	185.01 ± 5.96	84.66 ± 6.44	ND
	n=67	PvT	27.39 ± 4.3	192.61 ± 6.33	99.66 ± 9.47	ND
		AiL	23.9 ± 3.7	183 ± 3.0	82.50 ± 3.80	ND
Kruger et al. (2013)	n=34	PvT	27.2 ± 4.2	195 ± 2.0	105.1 ± 11.0	ND
	D1 Allemagne	GB	29.7 ± 5.5	194 ± 3.0	95.4 ± 4.7	ND
		AL	26.6 ± 3.5	193 ± 5.0	95.2 ± 8.7	ND
	n=32	AiL	23.2 ± 3.4	186 ± 3.0	84.8 ± 5.9	ND
	D2 Allemagne	PvT	22.8 ± 2.3	189 ± 3.0	91.6 ± 5.0	ND

Suite sur la page suivante

TABLEAU 1.5 – Suite de la page précédente.

Références	Sujets / niveau	Postes de jeu	Age (ans)	Taille (cm)	Masse totale (kg)	Masse grasse (%)
		GB	22.6 ± 2.7	191 ± 5.0	99.6 ± 8.0	ND
		AL	22.6 ± 3.5	192 ± 2.0	92.0 ± 9.8	ND
Nikolaidis et Ingebrigsten (2013)	n=44 D1 Grèce	tous postes	25.4 ± 6.1	184.1 ± 5.8	85.6 ± 9.0	17.6 ± 3.7
Povoas et al. (2014)	n=40 D1 Portugal	AiL	24.6 ± 2.8	177.3 ± 5.0	80.5 ± 6.1	10.5 ± 3.2
		AL	25.7 ± 4.1	191 ± 5.6	89.8 ± 7.4	8.9 ± 1.5
		PvT	24.4 ± 3.9	192 ± 2.7	98.6 ± 4.9	10 ± 2.4
		GB	26.2 ± 4.1	189.8 ± 2.2	87.4 ± 8.7	10 ± 0.8
Michalsik et al. (2015b)	n=26 top2 Danemark	tous postes	26.2 ± 3.1	188.9 ± 5.3	90.9 ± 9.0	ND
	n=9	AiL	24.9 ± 2.6	185.8 ± 5.3	80.9 ± 5.5	ND
	n=7	PvT	27.7 ± 2.3	194.7 ± 2.1	101.4 ± 8.3	ND
	n=7	AL	26.2 ± 3.4	187.0 ± 6.4	91.7 ± 6.7	ND
	n=3	GB	26.8 ± 2.4	188.7 ± 5.5	94.3 ± 6.8	ND
	n=157 D1 Danemark	tous postes	26.5 ± 5.0	188.7 ± 6.1	90.5 ± 7.9	ND
	n=32	AiL	25.0 ± 2.3	183.1 ± 5.0	82.0 ± 5.5	ND
	n=27	PvT	26.8 ± 3.2	192.0 ± 4.9	95.1 ± 7.1	ND
	n=67	AL	26.7 ± 2.8	189.4 ± 5.8	91.2 ± 6.2	ND
	n=26	GB	27.5 ± 3.0	191.4 ± 4.8	93.8 ± 7.3	ND

Etablir le profil anthropométrique peut également servir de critère d'adaptation de l'organisme à la CE (Burke et al., 1986; Gabbett, 2005). Une baisse significative de la composition corporelle peut en effet constituer un des premiers signaux d'alarme pour prévenir un éventuel état de surcharge d'entraînement, même s'il n'existe pas systématiquement de différence significative sur l'évolution du poids et du pourcentage de masse grasse à l'échelle d'une saison sportive (Gorostiaga et al., 2006). C'est pour cette raison que nous avons effectué un suivi longitudinal du profil anthropométrique des joueurs dans le cadre de nos travaux.

1.4 Profils métaboliques du joueur de handball

1.4.1 Métabolisme aérobie

Les réponses physiologiques consécutives à un entraînement ou un match à partir des mesures de FC et de $\dot{V}O_2$ ont depuis longtemps été investiguées. $\dot{V}O_{2max}$ est l'un des indicateurs de la capacité du système de prélèvement et du transport de l'oxygène (O_2) et de son utilisation au niveau cellulaire (Robinson, 1938). Elle représente la quantité maximale d' O_2 qu'un sujet peut consommer en 1 min. Elle témoigne non seulement de la capacité du système cardiorespiratoire à assurer un apport d' O_2 maximal aux muscles, mais également du degré d'utilisation de cet O_2 par les cellules musculaires. Elle peut s'exprimer en valeur absolue ($l.min^{-1}$), ou être rapportée à la masse corporelle ($ml.min^{-1}.kg^{-1}$). A partir d'un certain niveau d'exercice, $\dot{V}O_2$ n'augmente plus quelle que soit l'intensité d'exercice imposée : le sujet a alors atteint son $\dot{V}O_{2max}$. $\dot{V}O_{2max}$ facilite la capacité à répéter des efforts de haute intensité (McMahon et Jenkins, 2002) comme ceux réalisés en sport collectif.

Un certain nombre de paramètres sont à prendre en compte pour déterminer $\dot{V}O_{2max}$:

- Le caractère continu ou discontinu de l'exercice maximal à charge croissante (Froelicher et al., 1974).
- L'amplitude de l'incrémentation et la durée des paliers qui définissent la durée totale de l'exercice (Lachman et Prefaut, 1994).
- Le degré de pente si le test se déroule sur tapis roulant (Pokan et al., 1995).
- La fréquence de pédalage si le test est réalisé sur Ergocycle (Hermansen et Saltin, 1969) en fin de test.

1.4.1.1 Outils de mesure

Il existe un grand nombre de protocoles, de laboratoire ou de terrain, utilisés pour déterminer $\dot{V}O_{2max}$ ou la vitesse maximale aérobie (VMA), influençant de manière plus ou

moins importante la valeur finale. Le métabolisme aérobie peut être évalué à partir de tests dits "rectangulaire" (intensité stable) ou "triangulaire" (incrémentation progressive de l'intensité). Les protocoles sont multiples et le choix du test se fait en fonction de plusieurs paramètres dont le type d'activité sportive pratiquée, le nombre de sujets évalués en même temps, le matériel nécessaire et la durée de l'épreuve (Figure 1.27). Les protocoles peuvent également être de type "continu" (sans pause entre les paliers) ou "intermittent" (avec des pauses entre les paliers). Comme nous l'avons déjà indiqué ultérieurement, le test d'Astrand et Ryhming (1954) consiste en un exercice de 6 min à puissance constante. FC est mesurée en fin d'exercice et intégrée à un nomogramme. Parmi les tests permettant d'évaluer le métabolisme aérobie, le Leger et Thivierge (1988) consiste à courir sur une piste de 200m minimum et à suivre le rythme imposé par une bande sonore, qui augmente la vitesse de 1 km.h^{-1} toutes les 2 min. Des repères sont positionnés tous les 50m afin de contrôler la vitesse de course. Le test Vam-Eval de Cazorla et Léger (1993) consiste à courir autour d'une piste de 200m minimum avec une augmentation de la vitesse de 0.5 km.h^{-1} toutes les minutes. Le test Navette de (Leger et Lambert, 1982) représente le même protocole que le précédent mais se réalise en effectuant des allers-retours entre des repères espacés de 20m. Enfin, le test de Brue (1985) consiste à suivre un cycliste sur piste qui augmente la vitesse de 0.3 km.h^{-1} toutes les 30 s. Tous ces tests sont des tests progressifs à incrémentation rapide. Il existe plusieurs protocoles de tests à incrémentation lente. Le plus connu est certainement le test de l'Université de Bordeaux 2 (TUB2-1990). Il consiste à effectuer des paliers de 3 min avec une période de récupération de 1 min. La durée de chaque palier permet d'obtenir un plateau stable des principaux paramètres physiologiques (FC, $\dot{V}O_2$). Un des premiers tests intermittent utilisé dans le handball fut certainement le 45-15 de Gacon G (1994). Ce test, qui demande d'effectuer une alternance de course de 45 secondes et de récupération de 15 secondes, permet de déterminer une VMA intermittente. Le premier palier débute par une distance de 100 m (8 km.h^{-1}) ou de 125 m (10 km.h^{-1}) en 45 secondes selon public concerné. L'incrémentatation correspond à 0.5 km.h^{-1} par minute. La vitesse lors du dernier palier entièrement complété est considérée comme la VMA du sportif. Un test aérobie plus spécifique à l'activité handball est le 30-15 Intermittent Fitness Test (30 – 15_{IFT}) (Buchheit, 2009) (Figure 1.28) qui, à la différence des autres, permet d'estimer la consommation maximale d'oxygène et de déterminer une VMA intermittente de référence pour programmer les séries d'entraînement. Le test comprend des périodes de course d'une durée de 30 secondes, entrecoupées de périodes de récupération de 15 secondes sous forme de marche. Les 2 périodes consécutives constituent un palier. La vitesse de course débute à 8 km.h^{-1} et est incrémentée de 0.5 km.h^{-1} à chaque palier. Les données retenues sont la vitesse au dernier palier atteint, nommée vitesse intermittente et notée $V_{30-15 \text{ IFT}}$, ainsi que l'estimation de la consommation maximale d'oxygène qui s'obtient en utilisant la formule suivante :

$$\dot{V}O_{2max\ 30-15\ IFT}(ml.min.kg^{-1}) = 28.2 - 2.15 \times \text{genre} - 0.741 \times \text{age} - 0.0357 \times \text{poids} + 0.0586 \times \text{age} \times V_{30-15\ IFT} + 1.03 \times V_{30-15\ IFT}$$

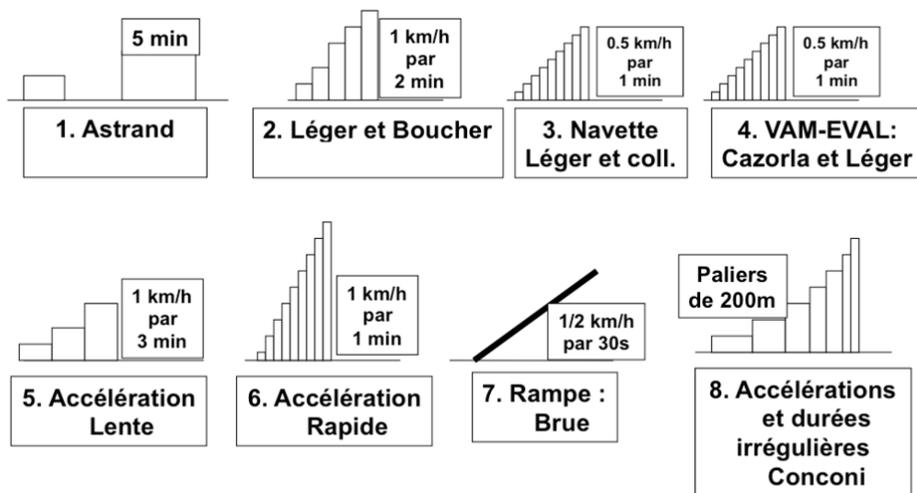


FIGURE 1.27 – Différents protocoles d'évaluation du métabolisme aérobie.

A travers ces différents exemples, nous voyons que les protocoles peuvent différer, avec soit une incrémentation lente, avec des paliers plus longs (1 $km.h^{-1}$ d'augmentation toutes les 3 min de course), soit une incrémentation plus rapide avec des paliers plus courts (0.5 $km.h^{-1}$ d'augmentation par minute de course).

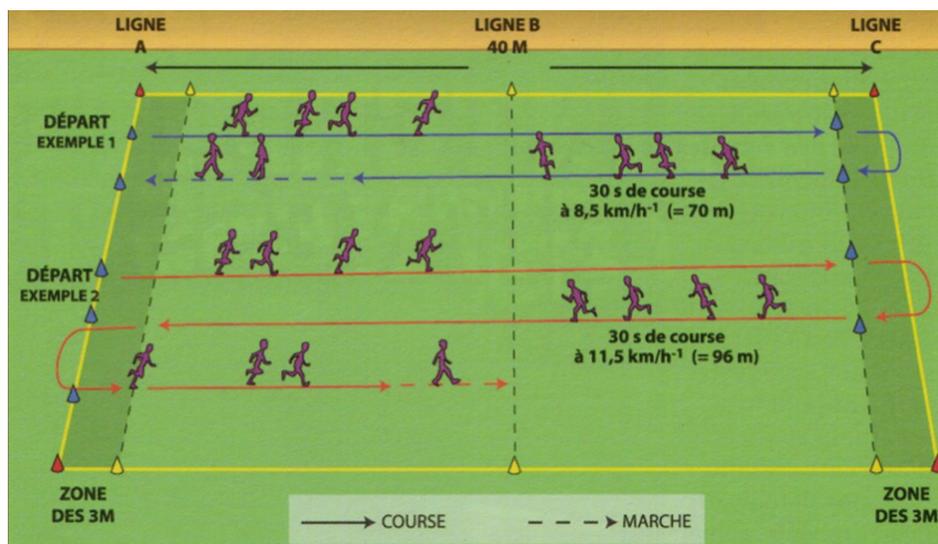


FIGURE 1.28 – M. Buchheit - Revue EPS N°32.

1.4.1.2 Etat de l'art

La littérature scientifique montre qu'un match de handball se caractérise par une alternance de phases d'efforts intenses séparées par des phases de récupération (Buchheit et al., 2009b; Delamarche et al., 1987; Rannou et al., 2001). Pour Marques et Gonzalez-Badillo (2006) il est nécessaire de développer le métabolisme aérobie des joueurs de handball afin de maintenir la performance sur toute une saison. Pour Buchheit et al. (2009b) et Schorer et al. (2009), une des caractéristiques clés de la performance en handball est la capacité aérobie, essentielle pour améliorer la cinétique de récupération entre les différents efforts (Kruger et al., 2013). Cette qualité aérobie liée à la $\dot{V}O_{2max}$, apparaît comme un élément indispensable à la pratique du handball de haut niveau. La mesure de $\dot{V}O_{2max}$ peut donc apporter des repères pertinents afin d'orienter les contenus d'entraînement. Plusieurs approches se sont succédées afin d'identifier $\dot{V}O_{2max}$ du joueur de handball. Une première approche consiste à mesurer $\dot{V}O_{2max}$ à partir d'un test de laboratoire, une seconde approche extrapole $\dot{V}O_{2max}$ à partir de mesures de FC et enfin une troisième approche consiste à mesurer $\dot{V}O_{2pic}$ sur le terrain en situation réelle de jeu. Cette dernière approche impose une analyse des échanges gazeux à l'aide d'un matériel portable, susceptible d'être encombrant, peu adapté à la pratique du handball et même dangereux lors d'une opposition directe avec un partenaire ou un adversaire.

Les premiers travaux qui se sont intéressés au profil physiologique de joueurs de handball sont ceux de Mikkelsen et Olesen (1976). Les auteurs ont mesuré $\dot{V}O_{2max}$ chez des joueurs issus d'équipes de haut niveau (équipe nationale Danoise et équipe de 1^{re} division Danoise). Cette étude a permis de déterminer $\dot{V}O_{2max}$ en laboratoire sur tapis roulant, mais également $\dot{V}O_{2pic}$ en situation réelle de jeu. Lors d'un match d'entraînement, les joueurs étaient équipés d'un sac de Douglas et pouvaient déclencher l'ouverture et la fermeture du sac en actionnant un robinet associé à un chronomètre. Les résultats de cette étude montrent des valeurs moyennes de $\dot{V}O_{2max}$ de $58.5 \pm 4.5 \text{ ml.min}^{-1}.kg^{-1}$ pour les joueurs du club de 1^{re} division et de $57.5 \pm 4.2 \text{ ml.min}^{-1}.kg^{-1}$ pour les joueurs de l'équipe nationale. Il faut attendre les travaux de Buchheit et al. (2009b) pour une nouvelle utilisation d'un dispositif portable de mesure des échanges gazeux (K4B2, Cosmed, Rome, Italie) sur des handballeurs de niveau national (21.0 ± 2.9 ans) en condition réelle de jeu. Les joueurs ont été étudiés sur de courtes périodes de jeu à effectif réduit (4 vs 4). Les résultats de cette étude montrent que les valeurs moyennes de $\dot{V}O_2$ enregistrées pendant les jeux réduits correspondent à 93.9 (88.2 à 99.6)% de $\dot{V}O_{2max}$ (Figure 1.29). Une des limites de cette étude est que les enregistrements ont été réalisés sur des périodes de jeu très courtes (3 min 45s), probablement peu représentatives de l'effort du handballeur. Les joueurs avaient également pour consigne de ne pas entrer en contact avec un partenaire ou un adversaire, occultant par là même une caractéristique importante de l'activité

handball.

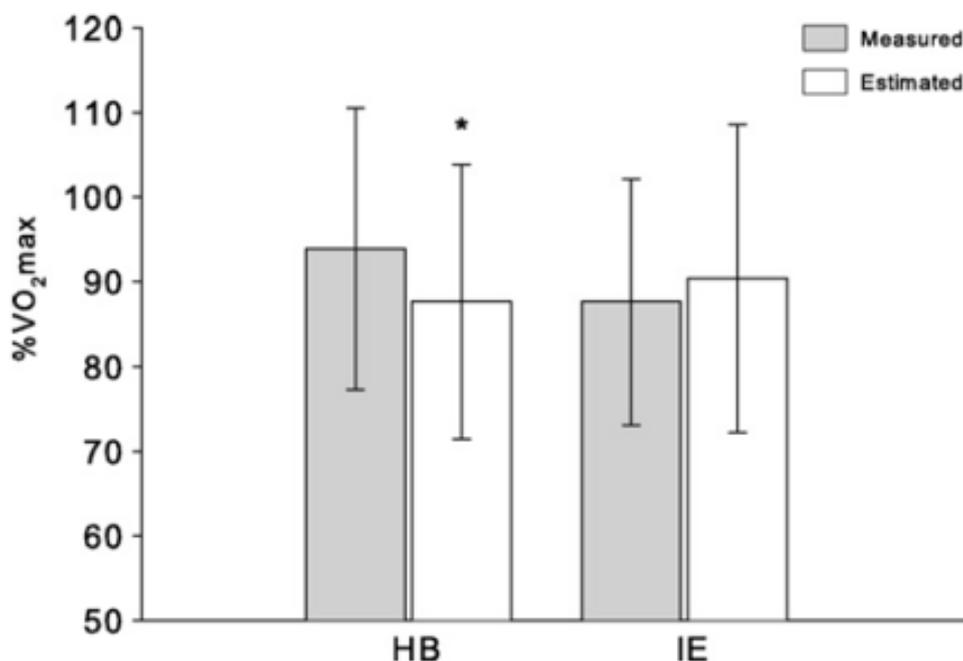


FIGURE 1.29 – Pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$ mesuré et estimé entre les jeux à effectif réduits et les exercices intermittents (Buchheit et al., 2009b).

HB : Handball; IE : Exercice intermittent.

Les travaux de Delamarche et al. (1987), réalisés sur des joueurs évoluant en 2^e division Française et âgés de 19.7 ± 1.11 ans, montrent des valeurs moyennes de $\dot{V}O_{2max}$ de $58.3 \pm 5.3 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ mesurées sur bicyclette ergométrique en laboratoire. Les auteurs de cette étude concluent qu'il n'y pas forcément de corrélation entre $\dot{V}O_{2max}$ et la performance, les joueurs ayant les niveaux de $\dot{V}O_{2max}$ les plus élevés ne sont pas forcément les plus actifs pendant un match. Plus tard, les travaux d'Alexander et Boreskie (1989) montrent, chez des joueurs de handball Canadiens de haut niveau, des valeurs moyennes de $\dot{V}O_{2max}$, mesurées en condition de laboratoire, comprises entre 53.1 et 55.2 $\text{ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ et des valeurs moyennes de FC, mesurées en match, comprises entre 80.6 à 88% de FC_{max} . Les travaux de Ramadan et Hassan (1999), réalisés sur l'équipe nationale Koweïtienne, font état d'une valeur moyenne de $\dot{V}O_{2max}$ de $50.8 \pm 1.4 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$. L'étude de Rannou et al. (2001), qui compare des joueurs de handball de niveau national et international à des sprinteurs, des athlètes spécialistes de l'endurance et des sédentaires, montre des valeurs moyennes de $\dot{V}O_{2max}$ de $57.7 \pm 3.1 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ pour les handballeurs de niveau national et de $58.7 \pm 0.9 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ pour les handballeurs de niveau international. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Bon (2001) qui observent des valeurs moyennes de $\dot{V}O_{2max}$ de $58 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ chez des handballeurs Croates de 1^{re} division. Plus récemment, Sporis et al. (2010) rapportent une valeur moyenne de

$\dot{V}O_{2max}$ de $54.0 \pm 4.1 \text{ ml.min}^{-1}.kg^{-1}$ chez des joueurs de l'équipe nationale Croate. En s'intéressant aux valeurs rapportées aux postes de jeu, [Sporis et al. \(2010\)](#) présentent des valeurs de $53.4 \pm 1.2 \text{ ml.min}^{-1}.kg^{-1}$ pour les GB, de $56.0 \pm 3.1 \text{ ml.min}^{-1}.kg^{-1}$ pour les AiL, de $53.7 \pm 5.2 \text{ ml.min}^{-1}.kg^{-1}$ pour les AL et de $50.8 \pm 0.5 \text{ ml.min}^{-1}.kg^{-1}$ pour les PvT. De leur côté, [Chaouachi et al. \(2009\)](#) montrent des valeurs moyennes de $\dot{V}O_{2max}$ de $52.83 \pm 5.48 \text{ ml.min}^{-1}.kg^{-1}$ pour des joueurs Tunisiens de niveau élite. [Povoas et al. \(2014\)](#), ont analysé les valeurs moyennes de $\dot{V}O_{2max}$, en fonction des postes de jeu, chez des joueurs Portugais évoluant en 1^{re} division. Les résultats de cette étude montrent des valeurs de $57.9 \pm 3 \text{ ml.min}^{-1}.kg^{-1}$ pour les AiL, de $53.4 \pm 5.9 \text{ ml.min}^{-1}.kg^{-1}$ pour les AL, de $53.8 \pm 2.4 \text{ ml.min}^{-1}.kg^{-1}$ pour les PvT et de $55.0 \pm 3.7 \text{ ml.min}^{-1}.kg^{-1}$ pour les GB. Tous ces résultats renvoient à des valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ très proches de celles de basketteurs ($50\text{-}60 \text{ ml.min}^{-1}.kg^{-1}$), comme le mettent en évidence [Ziv et Lidor \(2009\)](#) dans leur revue de littérature. A partir de ces différentes mesures on observe donc une différence non négligeable entre les valeurs mesurées en laboratoire et celles directement réalisées sur le terrain, voir extrapolées ([Mikkelsen et Olesen, 1976](#)). Ces résultats sont corroborés à ceux de [Michalsik \(2004\)](#), venant de données issues d'un match simulé d'une équipe Danoise, qui montre une valeur moyenne de 69% de $\dot{V}O_{2max}$.

De part l'importance de connaître les exigences physiologiques rencontrées par les joueurs au cours d'un match et au regard de la difficulté de mesurer $\dot{V}O_2$ en situation de jeu, de nombreuses études se sont intéressées à la mesure de FC chez des joueurs de handball. Les travaux de [Povoas et al. \(2012\)](#), montrent, sur un ensemble de 10 matchs officiels du championnat élite Portugais, une valeur moyenne de FC égale à $82 \pm 9.3\%$ de FC_{max} , tous postes confondus. Plus récemment, [Povoas et al. \(2014\)](#) ont mesuré FC, en fonction des postes de jeu, chez des joueurs Portugais de niveau élite. Ces mesures ont été réalisées au cours de 10 matchs officiels. Les résultats de cette étude montrent une valeur moyenne de FC égale à $79 \pm 10\%$ de FC_{max} pour les AiL, $84 \pm 9\%$ de FC_{max} pour les AL et enfin $83 \pm 9\%$ de FC_{max} pour les PvT. Ces résultats corroborent ceux de [Kruger et al. \(2013\)](#), qui, lors de matchs de championnat de 1^e et 2^e division Allemande, montrent des valeurs moyennes de FC égales à $83.4 \pm 1.0\%$ de FC_{max} pour les PvT, $86.4 \pm 1.8\%$ de FC_{max} pour les AL, $85.2 \pm 5.8\%$ de FC_{max} pour les AiL et $75.0 \pm 1.0\%$ de FC_{max} pour les GB. Ces résultats montrent la plus faible sollicitation cardiaque du poste de GB pendant un match. L'étude de [Corvino et al. \(2014\)](#) montre, chez des joueurs de 1^{re} division Italienne, que $42 \pm 12\%$ du temps total de jeu est passé à des valeurs de FC supérieures à 90% de FC_{max} . Ces résultats confirment que l'activité globale représentée par un match de handball est caractérisée par une prédominance d'activité à basse intensité ([Povoas, 2009](#)). Il est important de rappeler que la plupart des résultats présentés précédemment sont observés lors de matchs amicaux ou simulés ne reflétant pas exactement les réponses en conditions réelles de compétitions ([Sibila et al., 2004](#)). Les travaux de [Bangsbo \(1994\)](#) montraient

déjà, chez des footballeurs professionnels, des valeurs de FC plus faibles lors d'un match simulé par rapport à un match officiel. Il convient donc d'être prudent dans l'interprétation de ces résultats et d'être conscient de la limite des mesures de FC obtenues dans des sports d'opposition tels que le handball (Corvino et al., 2014). Certaines actions rencontrées dans le jeu, comme les sprints courts, les tirs ou certains duels sans déplacements du joueur, affectent peu la réponse de FC. De plus, les travaux de Thorlund et al. (2008) rapportent également à la fin d'un match que la FC moyenne baisse également, passant de 87% à 83% de FC_{max} , avec un temps plus important passé entre 65 et 85% de FC_{max} , montrant par là même que l'effet fatigue d'un match peut avoir des répercussions sur les réponses physiologiques des joueurs en situation de match.

TABEAU 1.6 – Récapitulatif des valeurs de $\dot{V}O_{2max}$.

Référence	Niveau	Poste de jeu	$\dot{V}O_{2max}$ ($ml.min^{-1}.kg^{-1}$)
Mikkelsen et Olesen (1976)	National Danemark	NA	57.5 ± 4.2
	D1 Danemark	NA	58.5 ± 4.5
Delamarche et al. (1987)	D2 France		58.3 ± 4.3
Alexander et Boreskie (1989)	National Canada		53.1
Ramadan et Hassan (1999)	National Koweit		50.8 ± 1.4
Rannou et al. (2001)	National		57.7 ± 3.1
	International		58.7 ± 0.9
Bon (2001)	National Croatie	GB	53.4 ± 1.2
		AiL	56.0 ± 3.1
		AL	53.7 ± 5.2
		PvT	50.8 ± 0.5
Chaouachi et al. (2009)	Elite Tunisie		52.83 ± 5.5
Povoas et al. (2014)	D1 Portugal	AiL	57.9 ± 3.0
		AL	53.4 ± 5.9
		PvT	53.8 ± 2.4
		GB	55.0 ± 3.7

GB : gardien de but; AiL : ailier; AL : arrière latéral; PvT : pivot.

1.4.2 Métabolismes anaérobie (alactique et lactique)

Le métabolisme anaérobie regroupe les filières énergétiques lactique et alactique.

1.4.2.1 Outils de mesure

Concernant le métabolisme alactique, le test le plus communément utilisé pour évaluer la puissance maximale des membres inférieurs est le test force-vitesse sur bicyclette ergométrique¹ (Ayalon et al., 1974; Pirnay et Criellaard, 1979). Au cours de ce test, une force de friction est appliquée sur la roue, déterminant une relation linéaire entre la force de pédalage et la vitesse de pédalage correspondante (Figure 1.30). Le déroulement du test consiste en une succession de sprints maximaux de quelques secondes contre différentes forces de freinage. La valeur du pic de vitesse V_{pic} est mesurée au cours de chaque sprint maximal.

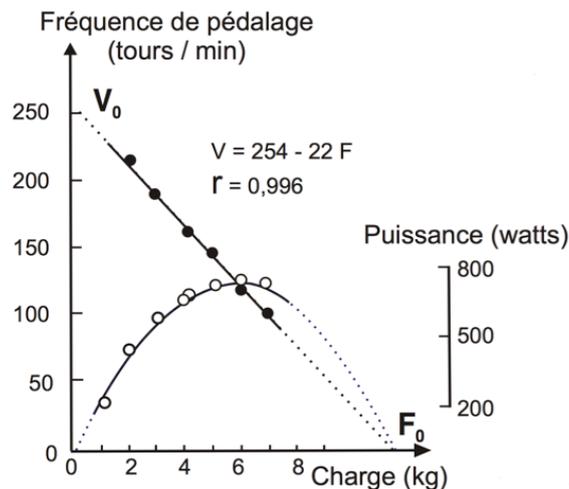


FIGURE 1.30 – Test de force-vitesse Vandewalle et al. (1987).

V_0 : vitesse de pédalage maximale pour une force nulle; F_0 : force de friction maximale pour une vitesse nulle.

La puissance maximale est le produit de la force maximale (F_0) par la vitesse maximale (V_0). Elle est obtenue pour un pic de vitesse égal à $0.5 \times V_0$ et une force égale à F_0 .

$$P_{max} = (0.5 \times V_0) \times (0.5 \times F_0) = 0.25 \times (V_0 \times F_0)$$

Concernant le métabolisme lactique, le test de Wingate (Ayalon et al., 1974) est probablement le "test lactique" le plus utilisé dans le monde sportif. Ce test consiste en un exercice de pédalage à vitesse maximale pendant 30 s contre une force de freinage constante

1. Nous faisons le choix de présenter ce test communément associé au métabolisme alactique alors que la littérature scientifique a démontré, de part les travaux de B. Mercier, que les concentrations d'acide lactique étaient importantes en fin de test.

établie en fonction du poids corporel (Figure 1.31). Pour une bicyclette ergométrique dont le développement est de 6.11m, la force de freinage proposée est de 75g par kilogramme de poids corporel. Une force de 87g par kilogramme de poids corporel ou mieux encore de 100g par kilogramme est préférable dans une population sportive moyenne (Vandewalle et al., 1987). Trois indices sont mesurés lors de ce test :

- La valeur du pic de vitesse au cours des 5-6 premières secondes.
- La quantité de travail mécanique effectuée pendant les 30s d'effort.
- L'indice de fatigue due à l'épuisement progressif du sujet, calculé à partir de la baisse de la puissance au cours de l'épreuve.

La valeur du pic de vitesse V_{pic} multipliée par la force de freinage, donne la valeur du pic de puissance (P_{pic}) pendant l'épreuve :

$$P_{pic}(watts) = F(kg) \times V_{pic}(tr/min)$$

Formule valable pour tout ergomètre dont le développement est de 6.11m.

Cette valeur de puissance est présentée comme une estimation de la puissance maximale anaérobie. La quantité de travail réalisée pendant les 30 s de l'épreuve correspond à une estimation de la capacité anaérobie. L'indice de fatigabilité représente la différence entre le pic de puissance et la valeur la plus basse de la puissance, divisée par le temps entre P_{pic} et la puissance minimale réalisée (P_{min}). La reproductibilité de la mesure du pic de puissance est très bonne dans la plupart des études ($r > 0.90$). La reproductibilité de la quantité de travail réalisée en 30 s également ($0.90 < r < 0.93$). En revanche, la reproductibilité de l'indice de fatigue est mauvaise ($0.43 < r < 0.74$) (Bar-Or et al., 1977; Patton et al., 1985).

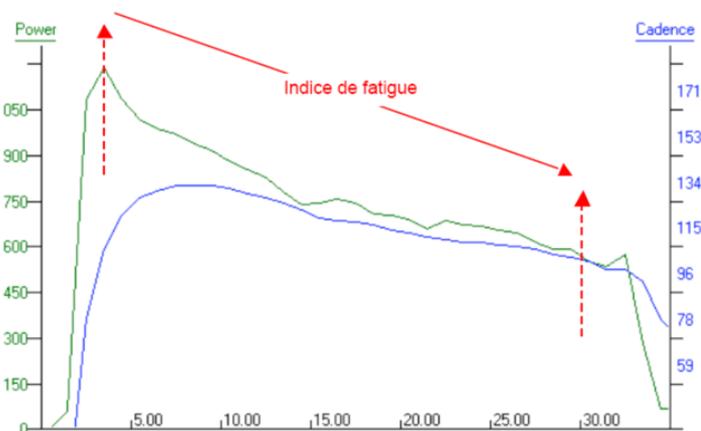


FIGURE 1.31 – Réalisation d'un test de Wingate (Grappe, 2012).

1.4.2.2 Etat de l'art

Afin d'aller plus loin dans la compréhension des sollicitations physiologiques lors de la pratique du handball, il convient de prendre en compte la multitude d'actions explosives répétées tout au long d'un match. Ces actions, représentées par des accélérations, des sprints, des sauts et des changements de direction (Gorostiaga et al., 2006; Michalisk, 2004) sont très coûteuses en énergie (Osgnach et al., 2010) et exigent des qualités importantes de force et de puissance (Young et al., 2001). Pour Chaouachi et al. (2009) la participation du métabolisme anaérobie est importante en handball. Pour Marques et Gonzalez-Badillo (2006), la force musculaire et la vitesse sont des facteurs déterminants de la performance pour la pratique du handball de haut niveau. Pour Schorer et al. (2009), les changements rapides entre les phases d'attaque et de défense nécessitent un bon niveau de performance en sprint.

De plus, lors d'un match, les séquences à hautes intensités sont séparées par des périodes de récupération de nature plutôt active (pour la moitié d'entre elles) et souvent supérieures à 90 s (Povoas et al., 2012). Cette récupération active est plus marquée pour les AL en comparaison avec les autres postes de jeu (Povoas et al., 2014). Pour Povoas et al. (2014), ces résultats s'expliqueraient par le positionnement des AL sur la partie centrale du terrain où le temps passé en possession du ballon est très important. Selon eux, lorsque les périodes de récupération sont inférieures à 30 s, la récupération du joueur est incomplète, ce qui provoque une diminution de ses performances physiques lors des actions qui suivent. Une fatigue neuromusculaire expliquerait donc la diminution du nombre d'actions à haute intensité lors de la seconde période d'un match (Povoas et al., 2014). La capacité à répéter des actions explosives pendant un match semble donc être un facteur déterminant de la performance en handball (Kruger et al., 2013). Selon Povoas et al. (2012), le développement des qualités physiques à l'entraînement devrait donc cibler davantage le métabolisme anaérobie que le métabolisme aérobie. Il semblerait également que la possibilité d'utiliser un temps mort par équipe et par mi-temps au cours d'un match (plus un troisième temps mort par entraîneur), ainsi que la possibilité d'effectuer des remplacements illimités, ne nécessiteraient pas forcément un métabolisme aérobie très développé (Povoas et al., 2012).

Concernant les actions de type sprint, Pers et al. (2002) montrent, à l'aide du système SAGIT, que la distance parcourue à une allure de sprint pendant un match représente 7% du temps total de jeu. Pori (2003), montre chez des joueurs Slovènes, lors de matchs amicaux, que DTP à une allure de sprint est de 620 ± 70 m, pour un total de 80 ± 14 sprints par match. Les travaux de Luig et al. (2008), réalisés au cours de matchs officiels des championnats du monde de 2007, montrent que la distance moyenne parcourue à une allure de sprint est égal à 88 ± 64 m, pour un total de 33 ± 16 sprints par match. Les auteurs

indiquent que les PvT parcourent environ 5 à 7m à une allure sprint, les AL environ 8m et les AiL environ 15 à 18m. Michalsik et al. (2013) montrent que la distance moyenne parcourue à une allure de sprint est égale à 78 ± 91 m.

Au regard des sollicitations présentées précédemment et de leur fréquence d'apparition, certains auteurs se sont intéressés à l'analyse des concentrations sanguines de lactate $[La]_{sg}$, moyen fréquemment utilisé pour étudier la sollicitation du métabolisme glycolytique, même s'il n'est que le reflet partiel de l'intensité d'exercice (Bangsbo, 1994). En effet, le métabolisme du lactate représente, à un instant t , la résultante entre son apparition et sa disparition dans le sang en tenant compte du délai entre sa production et son apparition dans le sang (Kustrup et al., 2006). Mikkelsen et Olesen (1976) ont étudié l'influence de la pratique du handball sur le métabolisme anaérobie glycolytique. Les résultats de cette étude montrent des valeurs de $[La]_{sg}$, mesurées au bout du doigt, de l'ordre de $3.0 \pm 1.9 \text{ mmol}^{-1}$ en fin de 2^e mi-temps pour les joueurs d'un club de 1^{re} division et de $5.8 \pm 2.1 \text{ mmol}^{-1}$ pour les joueurs de l'équipe nationale Danoise. Les travaux plus récents de Delamarche et al. (1987) se sont intéressés au profil physiologique de handballeurs de haut niveau. A partir d'une épreuve d'effort maximale à charge croissante réalisée sur bicyclette ergométrique chez des joueurs de handball de 2^e division (Tableau 1.7), les auteurs ont observés des valeurs de $[La]_{sg}$, mesurés au niveau de la veine du pli du coude, de l'ordre de 4.6 à 11.6 mmol^{-1} . Ces résultats mettent en avant que les joueurs les plus actifs sur le terrain produisent et tolèrent les plus hauts niveaux de $[La]_{sg}$.

TABLEAU 1.7 – Paramètres mesurés au cours d'une épreuve d'effort maximale à charge croissante réalisée sur bicyclette ergométrique (Delamarche et al., 1987).

Joueurs	Age ans	Taille cm	Poids kg	$\dot{V}O_{2max}$		FC_{max} $b.min^{-1}$	LA_{max} $mmol.l^{-1}$	FC $b.min^{-1}$	OBLA $\dot{V}O_2$ $l.min^{-1}$	% $\dot{V}O_{2max}$ $ml.min^{-1}.kg^{-1}$
				$l.min^{-1}$	$ml.min^{-1}.kg^{-1}$					
P1	19	185	79.5	4.44	55.8	200	7.9	187	3.35	75.4
P2	21	167	66.6	4.42	66.3	205	9.6	192	3.4	76.9
P3	21	176	70.3	4.15	59	191	9.7	174	3.65	87.9
P4	18	184	73.5	4.44	60.4	204	11.6	177	3.2	72.1
P5	19	183.5	82	3.95	46.9	176	4.6	165	3.6	
P6	20	179	81.5	4.08	50.1	190	5.8	182	3.65	89.5
P7	20	185.5	88	5.1	58.4	173	9.9	153	3.85	75.5
Moyenne	19.7 ± 1.11	180 ± 6.70	77.3 ± 7.5	4.47 ± 0.36	58.3 ± 5.3	194 ± 12	9.08 ± 1.99	176 ± 13	3.53 ± 0.22	79.5 ± 7.3

OBLA : Onset blood lactate accumulation.

Les résultats de Delamarche et al. (1987) vont dans le sens des travaux de Rannou et al. (2001) qui montrent que la capacité anaérobie joue un rôle fondamental dans un sport comme le handball. En effet Rannou et al. (2001) ont comparé le profil anaérobie de joueurs de handball de niveau international avec celui (i) de joueurs de handball de niveau national, (ii) d'athlètes spécialistes du sprint, (iii) d'athlètes spécialistes d'endurance et (iv) de sujets non entraînés. Les résultats de cette étude ne montrent aucune différence significative de $[La]_{sg}$, mesurée lors d'un test de Wingate, entre les handballeurs et les athlètes spécialistes du sprint. En revanche, les valeurs retrouvées chez les handballeurs

et les spécialistes du sprint étaient significativement différentes de celles retrouvées chez les athlètes spécialistes d'endurance ($11.8 \pm 1.0 \text{ mmol.l}^{-1}$) et chez les sujets non entraînés ($11.5 \pm 0.4 \text{ mmol.l}^{-1}$). Les joueurs de handball internationaux présentaient des valeurs de $[La]_{sg}$ de $15.3 \pm 0.7 \text{ mmol.l}^{-1}$, les handballeurs de niveau national présentaient des valeurs de $[La]_{sg}$ de $14.0 \pm 0.6 \text{ mmol.l}^{-1}$, et les athlètes spécialistes de l'endurance présentaient des valeurs de $[La]_{sg}$ de $11.8 \pm 1.0 \text{ mmol.l}^{-1}$. Les résultats de cette étude montrent également que les performances enregistrées lors du test de Wingate ne sont pas significativement différentes entre les spécialistes du sprint et les handballeurs nationaux et internationaux (Tableau 1.8).

TABLEAU 1.8 – Valeurs obtenues durant le test anaérobie de Wingate (Rannou et al., 2001).

Sujet	No.	W_{max} W	W_{max} $W.kg^{-1}$	W_{max} $W.kg^{-1}$ LBM	La $mmol.l^{-1}$
NHB	10	1067 ± 34	14.5 ± 0.5	16.7 ± 0.6	14.0 ± 0.6
IHB	7	1172 ± 47	14.8 ± 0.7	17.1 ± 0.7	15.3 ± 0.7
ST	11	1087 ± 21	15.4 ± 0.4	17.2 ± 0.4	15.9 ± 0.7
ET	8	$861 \pm 39^*$	$13.1 \pm 0.4^*$	$14.7 \pm 0.4^*$	$11.8 \pm 1.0^*$
UT	10	$851 \pm 34^*$	$12.3 \pm 0.6^*$	$14.1 \pm 0.8^*$	$11.5 \pm 0.4^*$

NHB : joueur de handball de niveau national; IHB : joueur de handball de niveau international; ST : Sprinteur; ET : Athlète en endurance; UT : Personne non entraînée; Wmax : puissance maximale.

Pori (2003) montre, chez des joueurs Slovènes de niveau élite, que les concentrations de lactate mesurées en fin de match se situent entre 2 et 6 mmol.l^{-1} . Povoas (2009) observe, chez des handballeurs Portugais de niveau élite pendant un match simulé, des valeurs de $[La]_{sg}$ de $4.2 \pm 2 \text{ mmol.l}^{-1}$ en fin de 1^{re} mi-temps et de $3.1 \pm 1.8 \text{ mmol.l}^{-1}$ en fin de 2^e mi-temps. Ces valeurs sont similaires à celles de Michalsik (2011) qui montre, chez des joueurs Danois de niveau élite, des valeurs de $[La]_{sg}$ de $3.7 \pm 1.6 \text{ mmol.l}^{-1}$ en fin de première mi-temps. Buchheit et al. (2008) observent, chez des joueurs Français de niveau national, des valeurs de $[La]_{sg}$ de l'ordre de 8.9 (6.6-11.2) $mmol.l^{-1}$.

Les importantes variations des valeurs de $[La]_{sg}$ reportées dans la littérature ne permettent pas de tirer des conclusions définitives sur la sollicitation du système glycolitique lors de la pratique du handball. Les résultats peuvent-être discutés au regard des sites de prélèvements, des moments de prélèvements et en fonction du profil du joueur (composante métabolique et musculaire, style de jeu, type de locomotion et du poste de jeu) (Karcher et Buchheit, 2014) (Figure 1.32). De plus, le déroulement d'un match peut influencer de manière non négligeable les résultats des valeurs retrouvées en fin de mi-temps ou en fin de match. Selon les dernières actions, leur niveau d'intensité et leur durée, l'implication du métabolisme lactique pourra être plus ou moins importante.

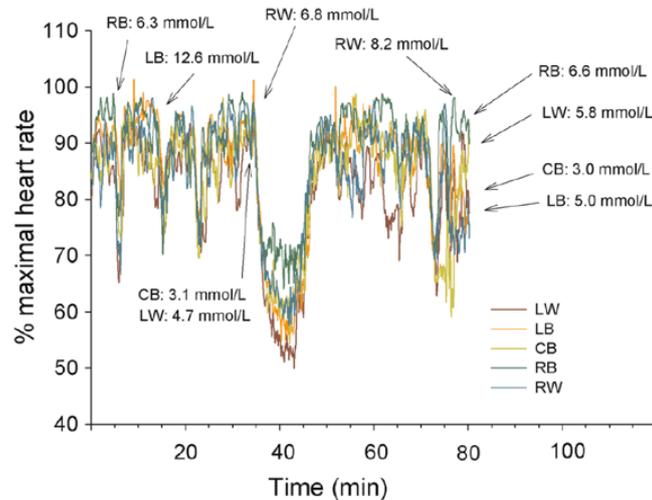


FIGURE 1.32 – Réponse individuelle de FC et de $[La]_{sg}$ durant un match de niveau national (Karcher et Buchheit, 2014).

CB : center back (DC), LB : left back (ALG), LW : left wing (AiLG), RB : right back (ALD), RW : right wing (AiLD).

1.5 Profil musculaire du joueur de handball

La performance sportive est la résultante d'une intervention musculaire caractérisée par trois principaux paramètres que sont la force, la vitesse et la durée (Edgerton, 1976). L'évaluation de la fonction musculaire poursuit deux objectifs majeurs avec (i) la recherche de performance (à travers les valeurs de force, de vitesse et de puissance) et (ii) l'évaluation du risque de blessure (à travers l'analyse des ratios musculaires et de la notion de souplesse). Les techniques d'évaluation du profil musculaire sont nombreuses : les mouvements analytiques segmentaires versus les mouvements globaux de déplacement du corps; les mouvements avec machines versus les mouvements avec le poids du corps ou haltères libres; les techniques utilisant les capteurs de mesure versus la détermination indirecte de la force développée ou bien encore les techniques mesurant la force résultante versus l'enregistrement de l'activité neuro-musculaire, constituent autant d'alternatives. La présentation, ci-après, des différentes techniques sera simplifiée en différenciant d'une part les techniques non-informatisées avec le poids du corps, barre libre ou machine de musculation et d'autre part les systèmes utilisant des capteurs de force statiques ou dynamométriques informatisés (Bernard et Verdera, 2008).

1.5.1 Outils de mesure

Une première technique de type statique, c'est à dire sans la mobilisation active de l'articulation du membre sollicité, consiste à utiliser le testing manuel. C'est une tech-

nique simple, rapide et efficace (Nicholas et al., 1978). Elle dissocie l'action des groupes musculaires agonistes et antagonistes à des angles variables (Daniel et al., 1988). Elle présente, en revanche, une faible reproductibilité (Croisier et al., 2008). L'utilisation d'un dynamomètre manuel constitue une autre alternative de type statique afin d'appréhender un éventuel déséquilibre entre les muscles antagonistes (Croisier et al., 2002). Cette technique présente néanmoins les mêmes limites que le testing manuel en termes de reproductibilité (Mayhew et Rothstein, 1985). L'évaluation de profil musculaire peut être appréhendée de manière plus rigoureuse par une approche dynamique, mettant en mouvement l'articulation du muscle sollicité. Une première technique, très utilisée sur le terrain, consiste à évaluer la force musculaire selon la masse soulevée sur une répétition maximale (1-RM) lors d'un mouvement particulier. Le risque de blessure avec cette technique a cependant justifié le développement d'équations et de tables permettant d'estimer de manière indirecte 1-RM à partir d'un nombre maximal de répétitions à charge sous maximale (Berger, 1961). Cette dernière technique repose sur le fait que lorsque le pourcentage de force augmente, le nombre de répétitions diminue de façon quasi linéaire (Sale et Mac Dougall, 1981). Une des premières tables à avoir été proposée est celle de Berger (1961). Elle a été élaborée à partir de résultats obtenus chez des sujets non entraînés (Tableau 1.9).

TABLEAU 1.9 – Evaluation de la 1-RM à partir de la table de Berger (1961).

Nb de rép.	% de la 1-RM
1	100
2	97.4
3	94.9
4	92.4
5	89.8
6	87.6
7	85.5
8	83.3
9	81.1
10	78.9

D'autres tables permettent le calcul indirect de la 1-RM. La table de Brzycki (1993) (Tableau 1.10) est sûrement la plus connue et la plus utilisée dans le milieu de l'entraînement.

L'équation issue de cette table est la suivante :

$$\text{Charge maximale estimée (1-RM estimée)} = \frac{\text{charge réalisée}}{1.0278 - 0.0278 \times \text{nombre de répétitions}}$$

Ce type d'évaluation, très utile pour individualiser l'entraînement, ne permet pas en

TABLEAU 1.10 – Table de Brzycki (1993).

1-R.M	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CHARGES INDICATIVES (arrondies au kilogramme supérieur)														
100	97	94	92	89	86	83	81	78	75	72	69	66	64	61
97.5	95	92	89	87	84	81	79	76	73	70	68	65	62	60
95	92	90	87	84	82	79	77	74	71	69	66	63	61	58
92.5	90	87	85	82	80	77	74	72	69	67	64	62	59	56
90	87	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55
87.5	85	83	80	78	75	73	70	68	66	63	61	58	56	53
85	83	80	78	76	73	71	68	66	64	61	59	57	54	52
82.5	80	78	76	73	71	69	66	64	62	60	57	55	53	50
80	78	76	73	71	69	67	64	62	60	58	56	53	51	49
77.5	75	73	71	69	67	65	62	60	58	56	54	52	49	47
75	73	71	69	67	65	62	60	58	56	54	52	50	48	46
72.5	70	68	66	64	62	60	58	56	54	52	50	48	46	44
70	68	66	64	62	60	58	56	54	52	51	49	47	45	43

1-RM : répétition maximale.

revanche de discriminer des muscles en particulier (Wilk et al., 2009) dans un but d'évaluer de manière précise le profil musculaire. Une autre technique, de type dynamique, peut s'effectuer par une évaluation de l'activité musculaire électromyographie (EMG). Il existe deux techniques d'EMG : l'EMG de détection et l'EMG de surface. L'EMG de détection consiste à étudier l'activité électrique d'un muscle par introduction d'aiguilles insérées au repos dans un muscle. L'EMG de surface, en revanche, est une méthode non invasive qui consiste à recueillir le signal électrique musculaire au moyen d'électrodes placées sur la peau. Ces deux techniques permettent d'enregistrer l'activité électrique du muscle strié squelettique se propageant au niveau des fibres musculaires et des nerfs afin de recueillir les informations relatives aux contributions des unités motrices actives (Colson, 2014). Toutefois, le recueil de l'activité électrique des muscles impliqués dans le mouvement par EMG reste peu exploité. Ceci peut s'expliquer par les contraintes méthodologiques liées à l'utilisation de cette méthode et par les difficultés rencontrées lors de l'interprétation des données.

De manière plus pratique, les mesures de hauteur de saut à partir des tests de détente verticale représente une méthode régulièrement utilisée dans le milieu de l'entraînement pour évaluer le profil musculaire des membres inférieurs. Ces évaluations apprécient les qualités de puissance et d'explosivité (Bosco, 1992) de l'athlète sur les muscles extenseurs des membres inférieurs, principalement les fessiers, les quadriceps et les mollets. Il existe plusieurs protocoles de tests, le plus ancien étant le Sargent (1924). Il consiste, à partir de la position debout, à sauter le plus haut possible et à toucher le mur avec une main (Figure 1.33). La finalité de ce test est d'évaluer une hauteur atteinte à partir de la mesure initiale effectuée debout bras plaqué contre le mur.

Afin d'encadrer plus rigoureusement ce type d'évaluation, d'autres tests existent comme le squat jump (SJ) et le contre mouvement jump (CMJ) (Figure 1.34). Le SJ consiste à réa-

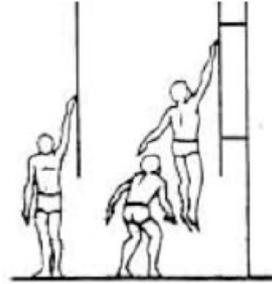


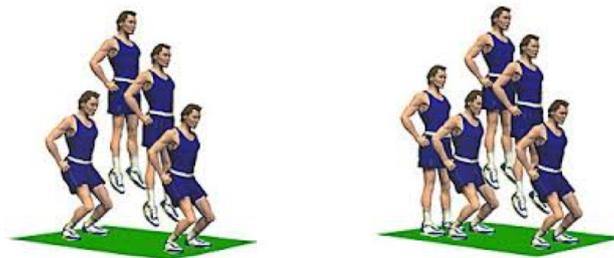
FIGURE 1.33 – Sargent test (1924).

liser un saut vertical à partir d'une position de flexion de genoux de 90° , mains sur les hanches, sans action de contre mouvement (action de flexion des membres inférieurs suivie immédiatement par une extension). Ces tests mesurent la puissance des membres inférieurs. La hauteur est alors définie par l'équation suivante :

$$\text{Hauteur maximale} = \frac{1}{8} \times g \times tv^2$$

où :

g = gravité (9.81 m.s^{-2}) ; tv = temps de vol (ms)



(a) Test SJ

(b) Test CMJ

FIGURE 1.34 – Tests SJ et CMJ (www.jlb.fr).

L'émergence des nouvelles technologies et l'avancée des sciences du sport permet aujourd'hui d'investiguer le profil musculaire du sportif à travers des tests standardisés de terrain. Les travaux de Jidovtseff (2006), ou plus récemment ceux de Samozino et al. (2008) permettent d'évaluer le profil force-vitesse des sportifs. En effet, Force et Vitesse partagent une relation inversement proportionnelle. Au fur et à mesure que la vitesse d'un mouvement augmente, la vitesse du raccourcissement musculaire augmente et la force qui peut être générée pendant ce mouvement diminue (Hill, 1938). De même, à mesure que la résistance augmente, la capacité de générer de la force pendant la contraction concentrique

est augmentée, entraînant une diminution simultanée de la vitesse du raccourcissement musculaire. En raison de cette relation force-vitesse (F-V), la puissance produite varie en fonction de la charge appliquée à un mouvement. L'entraînement avec une charge optimale (la plus efficace pour maximiser la puissance) se révèle produire les plus fortes augmentations de la puissance musculaire (McBride et al., 2002). Étant donné que la charge optimale varie en fonction de la nature d'un mouvement, il est impératif qu'une relation F-V soit appréhendée à partir de divers mouvements utilisés pour établir des contenus d'entraînements efficaces. De plus, dans les mouvements tels que le saut vertical, il a été rapporté que le développement d'une forte impulsion lors d'une poussée des membres inférieurs dépend de la capacité de puissance de ces membres inférieurs (Samozino et al., 2008). Cette relation décrit les variations de la force externe et de la puissance produite avec une vitesse de déplacement croissante. Elle peut-être résumée en 2 variables :

- La puissance maximale (Pmax) que les membres inférieurs peuvent produire sur une extension.
- Le profil F-V (la pente de la relation linéaire F-V) qui représente l'équilibre entre la force externe et les capacités maximales de vitesse (Samozino et al., 2013, 2011).

La caractéristique de ce profil est un facteur clé dans la programmation de l'entraînement physique du système neuromusculaire des membres inférieurs (Samozino et al., 2007). L'intérêt majeur de l'analyse de ce profil F-V dans les performances explosives a été démontré récemment à l'aide d'un modèle biomécanique macroscopique mettant en avant son effet sur les performances. La Pmax est associé à l'existence d'un profil F-V optimal individuel permettant de maximiser les performances de saut (Samozino et al., 2008, 2010, 2011). De récents travaux ont clairement démontré que le rendement d'un mouvement explosif dépend à la fois d'une Pmax élevée et d'un faible déséquilibre du profil F-V (différence entre le profil F-V de l'athlète et son optimum pour maximiser la capacité de saut) (Samozino et al., 2013).

Malgré l'intérêt majeur de pouvoir évaluer le profil F-V des athlètes, ce type de d'approche ne permet pas de différencier les muscles et les groupes musculaires dans l'évolution de valeurs

Dans le cadre de nos travaux, à des fins de caractérisation de la fonction musculaire et de son évolution liée à une saison sportive, nous avons sélectionné les tests SJ et CMJ. Il nous a semblé essentiel de compléter le profil musculaire par des mesures isocinétiques de force maximale et de puissance des muscles quadriceps et ischio-jambiers en mode concentrique et excentrique. Dans le cadre d'une approche longitudinale, la validité de ces mesures et l'appréhension des dimensions de balance musculaire agoniste versus antagoniste et coté dominant versus coté opposé justifient notre choix.

L'isocinétisme constitue une méthodologie d'évaluation et/ou de reconditionnement musculaire servant les objectifs de diagnostic, de suivi, de prévention et de recherche

(Dvir, 2004). Initialement utilisée à des fins de réhabilitation musculaire (Calmels et Minaire, 1995) vers la fin des années 1960 par Hislop et Perrine (1967), elle est très rapidement devenue, de part ses caractéristiques métrologiques (Kannus, 1994), un outil de référence pour l'évaluation de la force musculaire et la prévention des blessures (Croisier et al., 2002), notamment en milieu sportif. La dynamométrie isocinétique mobilise le muscle en référence à ses trois principaux critères d'adaptation que sont la longueur, la tension et la vitesse renvoyant respectivement aux qualificatifs de métrique, de tonique et de cinétique classiquement utilisés pour caractériser un muscle qui travaille (Bradley et Tibone, 1991). La modalité de "Tonique" est nommée isotonique (iso : même; onique : tension), lorsque la tension ne varie pas. Cette possibilité est rare dans le cas des mouvements segmentaires, de part le jeu des leviers osseux qui modifient continuellement les tensions développées lors du mouvement. Lors d'une variation de tension, la contraction sera alors anisotonique. La notion de "Métrique" renvoie à 2 sous catégories. Un premier type de contraction est nommé isométrique lorsque la longueur du muscle ne varie pas. Ce travail statique s'oppose à une contraction dynamique anisométrique correspondant à une variation de la longueur du muscle. L'augmentation de sa longueur correspond à un travail excentrique alors qu'à l'inverse son raccourcissement est nommé concentrique. Notons que la succession rapide d'un travail excentrique puis concentrique est nommé pliométrique et correspond à la mise en jeu du cycle "étirement-détente" et à la propriété d'emmagasinement-restitution d'énergie mécanique. La modalité "cinétique" se décompose en un travail à vitesse constante nommé "isocinétique". En pratique, le contrôle de la vitesse s'effectue sur le mouvement et non au niveau du muscle. Lors d'un mouvement à vitesse variable, ce qui est systématiquement le cas chez l'homme lors d'un travail dynamique, le terme d'"anisocinétique" est utilisé. Au sein des modalités de contraction musculaire (Figure 1.35), le régime isométrique se caractérise par une grande efficacité, un coefficient d'amélioration de la force élevée pour un travail musculaire réalisé à une position angulaire spécifique, facile à situer. Cela constitue les principaux avantages de ce mode de renforcement. Pour ce qui concerne ses limites, nous pouvons évoquer prioritairement un gain spécifique au secteur angulaire déterminé et la problématique de la spécificité et du transfert dans la gestuelle sportive. Le recrutement préférentiel des fibres musculaires rapides, la faible sollicitation des composantes élastiques, l'absence de travail de coordination, la saturation rapide de la progression et la monotonie de cette forme de travail constituent d'autres limites.

En ce qui concerne le renforcement anisométrique concentrique, les principaux intérêts de ce travail musculaire résident dans l'intégration de chaînes musculaires, l'amélioration de la force maximale, de la force-vitesse ou de l'endurance de force, ainsi que l'amélioration conjointe des aspects de coordination neuro-musculaire. Les principales limites sont relatives aux intensités relativement limitées de stimulations et de sollicitations tem-

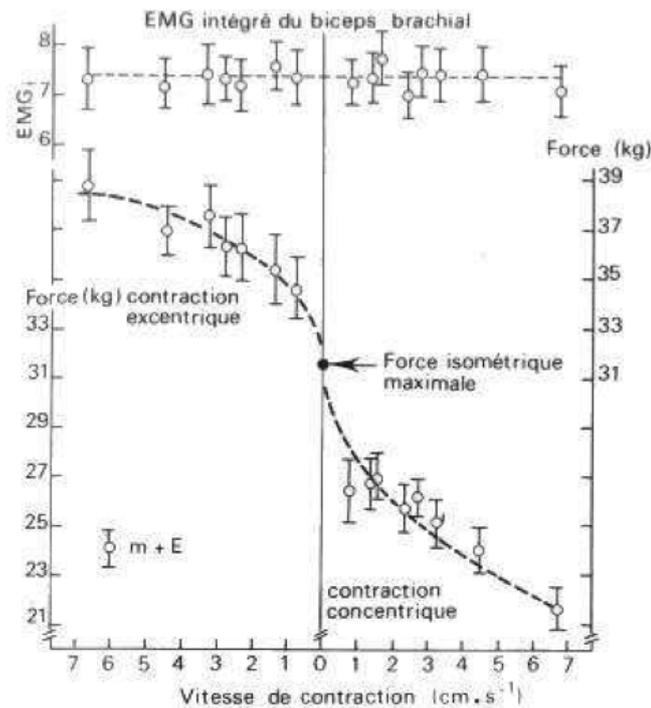


FIGURE 1.35 – Relation Force-Vitesse du muscle strié squelettique (moyenne-m et écart-type-E). (www.prevoist.pascal.free.fr).

porelles de contraction (Hakkinen et Komi, 1981). Tout comme la répartition irrégulière des tensions musculaires qui décroissent rapidement durant la réalisation du mouvement tandis que l'accélération de la charge déplacée augmente. De plus, les muscles sollicités en début de mouvement sont soumis à d'importantes tensions tandis que ceux qui participent à l'entretien du mouvement sont trop peu développés. Enfin, concernant le renforcement anisométrique excentrique, cette méthode engendre des tensions musculaires supérieures aux modes isométrique et concentrique. La sollicitation des différents éléments contractiles et élastiques du muscle ainsi que le développement capillaire constituent ses principaux avantages. Pour ce qui concerne les limites de ce mode de travail nommé aussi dynamique négatif ou freinateur, il est classique d'évoquer les douleurs et les micro-lésions affectant l'ultra-structure du muscle. De plus, le travail à vitesse rapide est difficile à contrôler et demeure potentiellement traumatique tandis que le travail à vitesse trop lente s'avère limité car peu fréquent au quotidien (Duchateau, 1984).

L'évaluation dynamique de la force musculaire par dynamométrie isocinétique réunit plusieurs avantages. Elle permet d'obtenir, grâce à une résistance auto-adaptée et régulée par un frein électromagnétique ou hydraulique, une contraction musculaire maximale à vitesse constante sur une amplitude donnée, partielle ou totale, d'une articulation (Hislop et Perrine, 1967; Levet et Thevenon, 1991). L'évaluation peut se réaliser sous les deux modes de contraction concentrique ou excentrique (Croisier et al., 2008), avec un inté-

rêt certain pour l'évaluation excentrique au regard des nombreuses actions dynamiques (courses, sauts. . .) rencontrées dans certaines pratiques sportives (Jidovtseff et al., 2005) et sur le fait qu'il permet le calcul du ratio mixte ischio-jambiers en excentrique (IJexc) / quadriceps en concentrique (Qconc), précisant le risque de blessures des IJ (Croisier et al., 2002). Un contrôle rétro-actif adapte en permanence la résistance du système à la capacité de force instantanée du sujet. Il est donc possible d'évaluer la force en tout point du mouvement, tout en considérant qu'il s'agit d'un couple de force produit par le sujet et dépendant des leviers biomécaniques mis en jeu. A la première génération de machine mise au point il y a une quarantaine d'années (Cybex), se sont aujourd'hui substitués des systèmes (Biodex, Con-Trex®...) utilisant des jauges de contraintes reliées à l'axe du système et qui mesurent en permanence le couple développé dès le démarrage du mouvement. De plus, tous ces systèmes sophistiqués sont, depuis les années 2000, équipés de correcteurs de gravité. Ils proposent de peser le poids du membre, afin que le résultat ne rentre pas dans le calcul des niveaux de force. Mécaniquement, les vitesses s'étendent de zéro degré par seconde ($0^{\circ} \cdot s^{-1}$) à $500^{\circ} \cdot s^{-1}$ selon les systèmes de mesure, bien qu'il faille considérer que plus la vitesse est grande et plus la plage de travail réellement isocinétique est petite, ce qui va à l'encontre de l'objectif d'une évaluation à vitesse constante. Pour l'articulation du genou, les vitesses préconisées en concentrique vont de 60 à $300^{\circ} \cdot s^{-1}$ et celles préconisées en excentrique vont de 30 à $120^{\circ} \cdot s^{-1}$. (Croisier et al., 2002).

Susceptible d'être considérée comme anti-physiologique, avec peu de comparaison dans les implications musculaires de terrain, l'évaluation isocinétique constitue, de part la précision de paramétrage et de sa reproductibilité (variabilité de 4 à 7% sur le moment de force en concentrique et en excentrique et de 3 à 9% sur le ratio fléchisseurs sur les extenseurs du genou) (Impellizzari et al., 2008) une alternative fiable et valide (Croisier et al., 2002; Davies, 1992; Dvir, 2004; Wilk et al., 2009). Dans le monde sportif, de nombreuses études utilisent cette technique dans un but de prévention des blessures, notamment sur l'articulation du genou. L'interprétation des valeurs mesurées, qui se fait à titre de comparaison avec le côté controlatéral et/ou des valeurs de référence, permet néanmoins la mise en place de programmes de renforcement musculaire adaptés. Au delà de cet aspect préventif, qui fait l'objet de nombreux travaux, il semblerait intéressant d'orienter les recherches sur un suivi longitudinal des niveaux de force (à partir des valeurs de Pic de couple) et de puissance (à partir des valeurs de puissance moyenne). A ce titre, peu d'études ont investigué le profil musculaire isocinétique de sportifs à l'échelle d'une saison. Le suivi longitudinal des valeurs de force, de puissance et des ratios permettraient de réadapter régulièrement le contenu d'entraînement en fonction des variations. Les différents tests explicités précédemment (de terrain ou effectués en laboratoire) doivent aider les staffs à mieux contrôler les répercussions des entraînements et des matchs sur le profil musculaire des athlètes.

1.5.2 Etat de l'art

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'étude des niveaux de force, de vitesse et de puissance peut se faire à travers plusieurs évaluations de terrain ou de laboratoire. Pour [Gorostiaga et al. \(2005\)](#), la force, la puissance musculaire et la qualité des appuis sont les facteurs les plus importants pour être performant à haut niveau en handball. Ces qualités physiques doivent-êtré développées de manière synchrone afin d'optimiser la performance de l'athlète. Pour cela, la mise en place d'évaluations régulières de la fonction musculaire devient incontournable. Cela permet d'ajuster le contenu des séances en fonction de l'individu. Toutes les évaluations décrites précédemment doivent aider les entraîneurs à mieux quantifier le contenu de la charge de travail globale, et ce, durant toute la saison.

Une des manières d'aborder l'évaluation du profil musculaire est donc d'effectuer des tests de terrain standardisés. Les travaux de [Marques et Gonzalez-Badillo \(2006\)](#) se sont intéressés à l'étude de joueurs Espagnols de niveau élite. Leurs résultats montrent des valeurs de CMJ allant de 36.82 ± 4.8 cm (1^{re} session de test) à 41.62 ± 5.6 cm (2^e session de test, 12 semaines après). L'étude de [Gorostiaga et al. \(2006\)](#) s'est également intéressée à des tests de détente verticale pendant la période pré-compétitive. Les résultats de cette étude montrent des valeurs de 45.2 ± 7.0 cm à 46.8 ± 7.7 cm. Les travaux de [Moncef et al. \(2012\)](#), effectués chez des handballeurs Tunisiens de niveau élite, montrent des valeurs moyennes de SJ de 32.10 ± 3.14 cm et de CMJ de 34.16 ± 4.47 cm. Les travaux de [Kruiger et al. \(2013\)](#), réalisés chez des joueurs de 1^{re} et 2^e division Allemande, montrent que les meilleures performances en SJ (40.4 ± 4.3 cm) et en CMJ (50.5 ± 3.7 cm) sont réalisées par les AiL. Ils montrent également qu'il n'y pas de différence significative selon les postes et les niveaux de jeu lors de sprints réalisés sur une distance de 5m. Ils indiquent enfin que l'habilité à répéter des sprints est un facteur déterminant de la performance au handball. Plus récemment, [Nikolaidis et Ingebrigsten \(2013\)](#) ont étudié le profil physique et physiologique de handballeurs du championnat élite Grecque. Les résultats de cette étude montrent des valeurs de CMJ allant de 32.2 ± 6.2 cm à 37.7 ± 3.7 cm et des valeurs de SJ allant de 31.0 ± 4.8 cm à 36.5 ± 4.5 cm. Les résultats des travaux de [KokouNouatin et al. \(2014\)](#), réalisés sur des joueurs du championnat élite du Benin, montrent des valeurs moyennes de 36.12 ± 4.60 cm au SJ et de 41.00 ± 4.49 cm au CMJ. Plus récemment, les travaux de [Massuca et Fragoso \(2015\)](#) montrent, chez des joueurs Portugais de niveau régional à élite, des valeurs moyennes de 36.08 ± 6.94 cm en SJ et de 38.55 ± 7.49 cm en CMJ. Enfin, [Haugen et al. \(2016\)](#), chez des joueurs évoluant en 1^{re} division Norvégienne et en équipe nationale Norvégienne, montrent que les valeurs de CMJ sont meilleures chez les AiL (39.00 ± 4.5 cm), comparativement aux AL (38.00 ± 4.8 cm), aux GB (35.00 ± 3.9 cm) et aux PvT (34.5 ± 4.5 cm).

Au delà des mesures effectuées à partir de tests de détente verticale, certaines études se sont intéressées à des mesures de force maximale. L'étude de [Gorostiaga et al. \(2006\)](#) a analysé les niveaux de force sur le haut du corps de joueurs Espagnols de niveau élite pendant la période pré-compétitive. Les résultats de cette étude montrent des valeurs de 1-RM au développé couché, allant de 104.8 ± 15.6 kg à 106.9 ± 11.9 kg. L'étude de [Haugen et al. \(2016\)](#), montre, chez des joueurs Norvégiens de niveau élite, que les valeurs de 1-RM sur le mouvement du squat, sont supérieures pour les AL, les GB et les PvT, (respectivement 131 ± 22 kg; 131 ± 24 kg et 131 ± 28 kg) comparativement aux valeurs de 1-RM des AiL (123 ± 19 kg). S'agissant du développé couché, les résultats de l'étude de [Haugen et al. \(2016\)](#) montrent des valeurs de 1-RM plus équilibrées entre les postes, mise à part pour les PvT qui présentent des valeurs plus élevées (108 ± 14 kg).

La problématique liée à la prévention des blessures et au suivi longitudinal de la fonction musculaire peut passer par la prise en compte d'un profil musculaire individualisé de l'articulation du genou au travers de l'évaluation isocinétique ([Croisier et al., 2002](#); [Kannus, 1994](#)). De nombreuses études se sont intéressées aux mesures de force des muscles du genou via un dynamomètre isocinétique. Les travaux de [Orchard et al. \(1997\)](#), réalisés chez des footballeurs professionnels Australiens, montrent, à partir de tests isocinétiques effectués sur Cybex à $60^\circ \cdot s^{-1}$, $180^\circ \cdot s^{-1}$ et $300^\circ \cdot s^{-1}$, que les blessures musculaires des IJ sont significativement associées à un faible ratio agoniste vs antagoniste (RAA). Les auteurs de cette étude concluent que des tests isocinétiques de pré-saison permettent d'identifier les joueurs à risque susceptibles de développer des blessures musculaires au cours de la saison. Ces résultats vont dans le sens des travaux de [Croisier et al. \(2008\)](#) qui montrent, chez des joueurs de football Belges, Brésiliens et Français, que la détection des déséquilibres de force en début de saison, grâce aux tests isocinétiques, diminue l'incidence des blessures musculaires. Malgré cela, les études scientifiques n'ont pas toujours identifié l'intérêt de l'isocinétisme à des fins de prévention des blessures. Une récente étude de [Dauty et al. \(2017\)](#), réalisée en début de saison sur 194 joueurs professionnels de football, a montré à partir des valeurs de différents ratios musculaires existants (le ratio IJ bilatéral concentrique vs excentrique : 0.85 à 0.90, le ratio conventionnel IJ vs Q : 0.6 à 0.47, et le ratio mixte IJ vs Q : 0.80 vs 1.0), que très peu de joueurs blessés présentaient des valeurs sous les seuils conventionnels. Ces auteurs en concluent que l'utilisation de l'isocinétisme n'est pas forcément prédictive des blessures musculaires.

L'évaluation isocinétique peut également servir à un suivi longitudinal des valeurs de force du train inférieur afin de contrôler et d'ajuster régulièrement l'entraînement. [Eniseler et al. \(2012\)](#) ont réalisé des tests isocinétiques chez des footballeurs Turques professionnels à l'échelle d'une période assez longue (24 semaines). Dans cette étude, les pic de couple (PC) des extenseurs (Tableau 1.11) et fléchisseurs du genou (Tableau 1.12) ont été mesuré à $60^\circ \cdot s^{-1}$, $300^\circ \cdot s^{-1}$ et $500^\circ \cdot s^{-1}$ au début et à la fin d'un championnat. Les résultats

de cette étude montrent une augmentation significative des valeurs de PC des IJ et des Q à haute vitesse angulaire ($500^{\circ}.s^{-1}$). Pour Eniseler et al. (2012) ces résultats s'expliquent par le nombre important d'entraînements spécifiques qui permettraient d'augmenter les valeurs de fin de saison à hautes vitesses angulaires.

TABLEAU 1.11 – Analyse des valeurs de pic de couple des quadriceps à $60^{\circ}.s^{-1}$, $300^{\circ}.s^{-1}$ et $500^{\circ}.s^{-1}$ (Eniseler et al., 2012).

	Extensor Peak torque (Nm)					
	60°/s		300°/s		500°/s	
	Dominant	Non-Dominant	Dominant	Non-Dominant	Dominant	Non-Dominant
Initial test	272.72±38.98	271.61±38.66	148.15±15.40	145.04±20.5	79.92±15.42	73.63±12.05
Final test	253.03±42.16	250.93±54.24	148.96±19.73	146.76±17.07	135.84±17.18	150.1±22.09
	p>0.05	p>0.05	p>0.05	p>0.05	p<0.01**	p<0.01**

TABLEAU 1.12 – Analyse des valeurs de pic de couple des ischios-Jambiers à $60^{\circ}.s^{-1}$, $300^{\circ}.s^{-1}$ et $500^{\circ}.s^{-1}$ (Eniseler et al., 2012).

	Flexor Peak torque (Nm)					
	60°/s		300°/s		500°/s	
	Dominant	Non-Dominant	Dominant	Non-Dominant	Dominant	Non-Dominant
Initial test	150.49±19.92	148.24±15.30	94.83±12.37	96.78±14.70	50.96±16.34	51.72±14.33
Final test	177.97±64.84	158.86±40.93	96.83±14.17	107.15±12.38	133.6±20.96	140.1±21.83
	p>0.05	p>0.05	p>0.05	p>0.05	p<0.01**	p<0.01**

Dans le handball, au regard des nombreuses sollicitations neuromusculaires des membres inférieurs, l'évaluation des adaptations de la fonction musculaire du genou a rarement été investigué. L'étude de [Carvalho et al. \(2014\)](#), réalisée sur des joueurs Portugais semi-professionnels, montre l'impact de douze semaines d'entraînement combiné (pliométrie avec charges additionnelles) sur les niveaux de force maximale isocinétique mesurées à une vitesse de $90^{\circ} \cdot s^{-1}$. Les résultats de cette étude montrent une augmentation significative des valeurs de force en excentrique de l'agoniste du côté gauche (9.6 %), et des valeurs de force excentrique de l'antagoniste du côté droit (Tableau 1.13).

[González-Ravé et al. \(2014\)](#) ont comparé, chez des joueurs de handball Espagnols de 1^{re} ligue, des valeurs de PC isocinétique mesurées au niveau de l'articulation du genou avec des résultats à des tests de détente verticale. Ces auteurs ne constatent aucune différence significative entre les valeurs de PC à $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ et $180^{\circ} \cdot s^{-1}$. Dans cette étude, aucune corrélation significative n'était observée entre les PC isocinétique et la détente verticale (Tableau 1.14). Au final, peu d'études se sont intéressées au suivi du profil musculaire chez des joueurs de handball à l'échelle d'une saison entière. La mesure des caractéristiques physiques et physiologiques donne des informations utiles sur le statut du joueur en vue de la mise en place de programmes spécifiques adaptés ([Karcher et Buchheit, 2014](#)). Comme l'entraînement de handball seul ne permet pas l'amélioration des qualités physiques malgré une augmentation du temps consacré à l'entraînement ([Povoas, 2009](#)), des séances spécifiques de développement de la force, de la vitesse et de la puissance sont indispensables pour améliorer la performance des tirs, des sauts et des changements de direction du joueur au handball ([Harries et al., 2012](#)). L'évaluation isocinétique permettrait de contrôler de manière rigoureuse l'évolution des valeurs de force, de puissance et des différents ratios sur l'ensemble de la saison sportive afin de maintenir une fonction musculaire la plus efficiente possible.

TABEAU 1.13 – Valeurs moyennes et écart-type d’un protocole isocinétique, avec le gain en valeur absolue (Abs) et en pourcentage (%) (Carvalho et al., 2014).

N*m	Pre test		Pos test		Gains		Value	
	Mean	SD	Mean	SD	Abs.	%	t	P
ISMLAG	286,30	±38,21	292,80	±38,34	6,50	2,2	-0,853	0,416
ISMLANT	120,00	±20,13	135,40	±15,13	15,40	11,4	-2,871	0,018*
ECCLAG	320,90	±50,11	355,10	±52,28	34,20	9,6	-6,163	0,000*
ECCLANT	170,60	±15,52	179,00	±29,60	8,40	4,7	-1,109	0,296
CONCLAG	246,30	±28,71	249,50	±24,58	3,20	1,3	-0,568	0,584
CONCLAN	152,70	±29,23	159,60	±26,11	6,90	4,3	-1,189	0,265
ISMRAg	295,00	±41,71	302,00	±38,74	7,00	2,3	-0,496	0,633
ISMRAnt	137,44	±22,93	149,33	±26,16	11,89	8,0	-2,307	0,050*
ECCRAg	345,00	±39,87	361,78	±43,28	16,78	4,6	-1,352	0,213
ECCRAnt	178,67	±21,48	191,33	±22,93	12,67	6,6	-2,635	0,030*
CONCRAg	258,22	±38,22	257,11	±27,03	-1,11	-0,4	0,246	0,812
CONCRAnt	179,11	±35,03	177,33	±18,10	-1,78	-1,0	0,183	0,859

ISMLAG : isométrique agoniste gauche; ISMLANT : isométrique antagoniste gauche; ECCLAG : excentrique agoniste gauche; ECCLANT : excentrique antagoniste gauche; CONCLAG : concentrique agoniste gauche; CONCLAN : concentrique antagoniste gauche; ISMRAg : isométrique agoniste gauche; ISMRAnt : isométrique antagoniste gauche; ECCRAg : excentrique agoniste gauche; ECCRAnt : excentrique antagoniste gauche; CONCRAg : concentrique agoniste gauche; CONCRAnt : concentrique antagoniste gauche.

TABEAU 1.14 – Coefficients de corrélations entre les pic de couple isocinétique et les résultats aux tests de détente (González-Ravé et al., 2014).

		DOMINANT			
		knee extension 60°/s	knee flexion 60°/s	knee extension 180°/s	knee flexion 180°/s
CMJ height	Pearson Correlation	0.097	0.074	-0.060	0.073
	p	0.789	0.838	0.868	0.840
SJ height	Pearson Correlation	-0.123	-0.111	-0.326	-0.136
	p	0.733	0.759	0.356	0.707
CMJ Peak Power	Pearson Correlation	-0.201	-0.003	-0.305	-0.058
	p	0.576	0.991	0.391	0.871
SJ Peak Power	Pearson Correlation	-0.154	0.088	-0.250	0.047
	p	0.669	0.807	0.485	0.895
		NON-DOMINANT			
		knee extension 60°/s	knee flexion 60°/s	knee extension 180°/s	knee flexion 180°/s
CMJ height	Pearson Correlation	0.150	-0.526	0.321	0.027
	p	0.679	0.118	0.364	0.938
SJ height	Pearson Correlation	0.175	-0.327	0.038	-0.198
	p	0.628	0.354	0.916	0.581
CMJ Peak Power	Pearson Correlation	-0.359	0.124	-0.341	0.103
	p	0.308	0.731	0.334	0.776
SJ Peak Power	Pearson Correlation	-0.433	0.184	-0.309	0.229
	p	0.211	0.609	0.384	0.522

CMJ : contre mouvement jump; SJ : squat jump.

1.6 La quantification de la charge d'entraînement

Le concept d'homéostasie est défini comme le processus de régulation par lequel l'organisme vivant maintient les différentes constantes de son milieu intérieur entre les limites des valeurs normales (def larousse, www.larousse.fr). Le but est donc de maintenir constant le milieu intérieur face à un environnement changeant. Les premiers travaux de Cannon (1932) décrivent les concepts physiologiques fondamentaux permettant de mettre en lien l'organisme et le milieu dans lequel il évolue. Selye (1975) montre que les réponses de l'organisme face à différentes perturbations sont très spécifiques et presque toujours identiques selon les situations. Pour cet auteur, les trois stades successifs du Syndrome Général d'Adaptation, sont représentés par la réaction d'alarme (mobilisation des défenses), la résistance (adaptation complète à l'agent stressant) et enfin l'épuisement. Fort de ce constat, il convient d'établir, dans le milieu sportif, un plan d'entraînement structuré afin d'estimer le plus précisément possible les réactions internes du sportif face aux perturbations subies par les entraînements et la compétition. Les premières réflexions autour des principes théoriques de la méthodologie de l'entraînement amènent à se questionner sur la planification d'entraînement en fonction des différents moments de la saison (Matveiev, 1980). Ces travaux montrent qu'il est nécessaire de faire varier l'entraînement selon différents modèles (exemple : traditionnel vs. par bloc) pour faire apparaître des états de forme pendant lesquels le sportif optimise son potentiel de performance. La CE est alors définie comme un stress (induit par différents facteurs : physiologique ou psychologique) correspondant à un stimulus. CE peut être appliquée sur des périodes de temps variables (secondes, minutes, heures, jours, semaines, mois et années) et à des degrés variables (fréquence et intensité) (Soligard et al., 2016). L'organisation de CE doit permettre à l'entraîneur d'amener le sportif à des pics de forme à des moments déterminés. La quantification de CE, au travers des principales variables que sont l'intensité, la durée et la fréquence (Borresen et Lambert, 2009), participe alors de la maîtrise temporelle des adaptations du sportif à l'entraînement (Banister et Hamilton, 1985). Il convient toutefois de définir des limites dans cette gestion de CE. Ces limites vont se situer entre le risque de "sur-charge", i.e., lorsque les exigences de l'entraînement dépassent les capacités du sportif (Borresen et Lambert, 2009) et le risque de "sous-charge", i.e., lorsque l'athlète ne s'entraîne pas suffisamment pour maintenir son niveau de performance (Bosquet et al., 2008). Ces limites doivent permettre à l'entraîneur de définir une zone optimale de CE, propre à chaque sportif (Morin et al., 2014). Dans le cas d'une organisation équilibrée de CE, la fatigue induite par l'entraînement est réversible (en quelques jours ou semaines) et de courte durée. On parle de phase de surmenage ou "d'overreaching" (Meeusen et al., 2013) qui entraîne une fatigue aiguë, qui se traduit par une baisse, à court terme, du niveau de performance (Busso et al., 2002; Coutts

et al., 2007; Lehmann et al., 1998). Lorsque CE est trop importante, et que les périodes de récupération sont insuffisantes, un état de fatigue va perdurer et ne sera potentiellement réversible qu'à long terme. On parle alors de surentraînement ou "overtraining" (Halsen et al., 2003) qui se caractérise par (i) une altération des performances, (ii) des troubles de l'humeur et (iii) du sommeil. Cet état, plus complexe à anticiper, nécessite le prélèvement d'informations régulières (Budgett, 1998). Afin de définir précisément CE, il convient d'étudier la relation qui la lie avec les réponses qu'elle induit. On parle alors de relation "dose-réponse", où CE représente la "dose" et les "réponses" correspondent à l'ensemble des adaptations induites par l'entraînement et/ou la compétition (Borresen et Lambert, 2009). Cette approche permet surtout de maîtriser les phases de sur-charge inappropriées ou "non-fonctionnelles", qui peuvent être à l'origine de blessures (Halsen, 2014). Cette approche permet également de créer du lien entre l'athlète et les différents membres des staffs technique et médical en renforçant la confiance que l'athlète peut avoir dans le monitoring. La quantification de CE demeure toutefois une démarche complexe en sport collectif, où de multiples variables peuvent influencer les réponses à l'entraînement. De plus, au plus haut niveau, les nombreuses compétitions, les nombreux entraînements et les nombreux déplacements peuvent induire une augmentation de la fatigue, accompagnée d'une dégradation de la performance (Meeusen et al., 2013). Cette fatigue, considérée comme le rapport déséquilibré entre les phases d'entraînement et de récupération (Borresen et Lambert, 2009), concerne aussi bien les aspects physiologiques que psychologiques, tels que le stress ou la motivation (Morin et al., 2014). Ce contexte très spécifique doit pousser les entraîneurs à recueillir le plus de données possibles sur les joueurs afin de mieux apprécier leurs capacités et de mieux optimiser les processus d'entraînement à court, moyen et long termes. Ces données sont d'autant plus importantes en sports collectifs que la période de compétition dure plusieurs mois et qu'un athlète ne peut pas maintenir un niveau très élevé de performance sur une période aussi longue (Manzi et al., 2010). Il est donc important d'évaluer (i) les différentes périodes d'entraînement dans leur ensemble, et (ii) les effets différés des entraînements associés aux caractéristiques intrinsèques de l'athlète. Le principal problème réside dans le choix des marqueurs permettant une organisation efficace de CE tout au long d'une saison sportive (Morin et al., 2014). La quantification de CE peut se faire à partir de plusieurs variables, objectives ou subjectives. On différenciera ainsi (i) les variables représentant la CE_{ext} correspondant à des variables "observables", tels que le nombre de kilomètres, le nombre d'heures de pratique, le nombre de répétitions, ... et (ii) les variables représentant la charge d'entraînement interne (CE_{int}) correspondant aux variations de paramètres tels que FC, $[La]_{sg}$, les changements endocriniens, la perception de l'effort, ... (Tableau 1.15).

TABLEAU 1.15 – Exemple de variables utilisables pour quantifier CE (Soligard et al., 2016).

Type de charge	Exemple de mesures
Charge Externe	Temps d'entraînement et/ou de compétition. Fréquence d'entraînement et/ou de compétition. Type d'entraînement et/ou de compétition. Analyse de l'activité (ex : données GPS). Puissance musculaire, vitesse, accélération. Fonction neuromusculaire (tests de détente, test isocinétique, ...). Décompte du nombre de mouvements/répétitions. Ratio "aigue/chronique" (Gabbett, 2016).
Charge Interne	Perception de l'effort et session rating of perceived exertion (sRPE). Questionnaires psychologiques (POMS, RESTQ, TQR, DALDA). Sommeil (qualité et durée). Evaluation biochimique, hormonale et/ou immunologique. Fréquence cardiaque (FC). Ratio "FC/RPE". Variabilité de fréquence cardiaque (VFC). Training impulses (TRIMP). $[La]_{sg}$ Ratio $[La]_{sg}/RPE$.

POMS : profil des états d'humeur; RESTQ : questionnaires de stress et de niveau de récupération pour athlètes; DALDA : analyses quotidiennes de la vie sportive et extra-sportive des athlètes; RPE : niveau de perception de difficulté d'effort; FC : fréquence cardiaque; RPE : échelle de perception d'effort; sRPE : session RPE.

1.6.1 Le concept de la charge d'entraînement externe

1.6.1.1 Outils de mesure et état de l'art

La démocratisation de nouvelles technologies et la validation de certaines d'entre elles (Drew et Finch, 2016; Jennings et al., 2010; Kempton et al., 2013), a permis de multiplier les outils susceptibles d'être utilisés pour quantifier CE_{ext} . Nous avons déjà présenté ces outils dans le chapitre sur la locomotion du handballeur, nous ne les présenterons donc pas à nouveau dans ce chapitre.

1.6.2 Le concept de la charge d'entraînement interne

Les méthodes et modèles de quantification de CE_{int} reposent sur des mesures objectives et subjectives de variables qui représentent les stress physiologique et psychologique imposés à l'athlète. CE_{int} peut être mesurée via une multitude de paramètres (FC, $[La]_{sg}$, $\dot{V}O_2$, rating of perceived exertion (RPE), paramètres sanguins, questionnaires. . .) (Halson, 2014). Ces variables sont ensuite utilisées dans différents modèles permettant une modélisation de CE exprimée le plus souvent en unité arbitraire.

1.6.2.1 Outils de mesure

Il est plus ou moins complexe d'évaluer CE en fonction des disciplines sportives. Les disciplines comme la course à pied, la musculation, le cyclisme, . . . permettent une quantification "relativement" facile de la quantité (distance parcourue, nombre de répétitions) et de l'intensité (vitesse moyenne, % relative de la charge maximale, . . .) de l'exercice physique. Pour les sports collectifs, de part la diversité des actions et des types d'entraînement, la quantification de CE est plus problématique. Pour modéliser CE_{int} , il existe plusieurs modèles qui se caractérisent par au moins une variable d'entrée, une variable de sortie et une fonction de transfert, i.e., un modèle mathématique qui relie l'entrée et la sortie. Le modèle à 2 composantes de Banister et al. (1975) a été le premier à tenter de lier l'entraînement (ici le travail (w)) à la performance (p) (Figure 1.36). A l'aide de leur modèle, ces auteurs tentent de relier la charge liée à l'entraînement à la performance en fonction du temps à l'aide de deux équations différentielles qui caractérisent, pour l'une les effets positifs de la pratique sur la performance (l'aptitude), et pour l'autre les effets négatifs, à savoir la fatigue. Ce modèle a depuis, fait l'objet de nombreuses variantes sans remettre en question son concept fondamental : la notion de "stimulus-réponse". Il consiste à identifier les stimuli et les réponses en une boucle de rétroactions positives qui augmentent ou diminuent la performance. Dans ce modèle, l'entraînement est représenté par la dose d'entraînement et correspond à l'entrée du système, alors qu'à la sortie se trouve la performance.

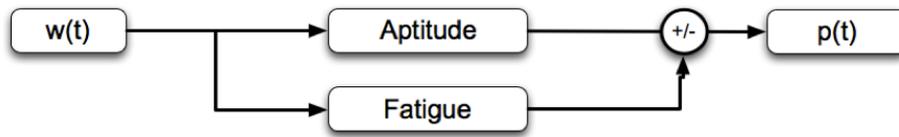


FIGURE 1.36 – Modèle à deux composantes de Banister et al. (1975) modélisant les effets de l'entraînement (w) sur la performance (p) en fonction du temps.

$w(t)$: entraînement à l'instant t , exprimé en unités arbitraires (U.A), $p(t)$: performance à l'instant t , négative ou positive de la fatigue.

Ce modèle permet, à partir d'une équation mathématique de type différentielle, de caractériser l'influence de l'un et l'autre de ces concepts sur la performance. La résultante, la performance, correspond à la différence entre les effets positifs liés à l'aptitude et les effets négatifs liés à la fatigue. Ces deux composantes du modèle présentent des cinétiques d'évolution en réponse à l'entraînement bien différentes. En effet, la réponse de la fatigue est d'une ampleur plus importante et varie rapidement tandis que l'aptitude présente une réponse à la charge d'une amplitude inférieure à celle de la fatigue mais elle perdure davantage dans le temps. En réponse aiguë, le niveau de fatigue modélisé est supérieur au niveau d'aptitude, induisant une baisse du niveau de performance. Au fur à mesure, face à une charge de travail unique (Figure 1.37), le niveau de fatigue se dissipe plus rapidement que l'aptitude. Au bout de quelques jours, le niveau de fatigue résultant de la séance d'entraînement et/ou de compétition devient inférieur au niveau d'aptitude découlant de la séance, générant une augmentation de la performance par rapport au niveau initial. Cette évolution rappelle ainsi le principe de surcompensation.

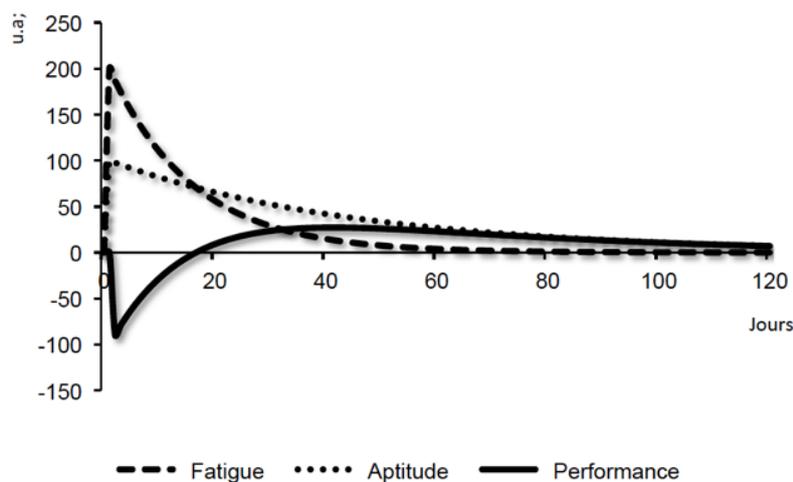


FIGURE 1.37 – Modélisation de l'évolution de la fatigue, du niveau d'aptitude, et du niveau de performance en réponse à une charge de travail physique unique (une seule séance) (Morin et al., 2014).

Pour être encore plus précis, le modèle proposé par [Calvert et al. \(1976\)](#) est défini par l'équation ci-dessous où $p(t)$ correspond à la performance à l'instant t et où k est une constante de pondération de la fatigue. Les constantes τ_1 et τ_2 représentent les constantes de temps du déclin de l'aptitude, dont les valeurs respectives sont comprises entre 38 et 60 jours pour la première et égale à 5 jours pour la seconde. τ_3 correspond à la constante de temps associée à la fatigue dont la valeur semble comprise entre 11 et 15 jours ([Taha et Thomas, 2003](#)). La principale limite de ce modèle est de ne pas intégrer les effets du désentraînement après l'arrêt de l'entraînement.

$$p(t) = [(e^{-\frac{t}{\tau_1}})^{-\frac{1}{\tau_2}} - K e^{-\frac{t}{\tau_3}}] \times w(t)$$

Equation de [Calvert et al. \(1976\)](#) modélisant la quantification des effets de l'entraînement sur la performance.

La quantification des variables d'entrée et de sortie représente une première étape d'identification de CE. Cette quantification quotidienne de CE_{int} , contrainte imposée à l'organisme ([Busso et al., 1991](#)), est indispensable afin de maîtriser les effets de l'entraînement. Selon les disciplines sportives et la méthode utilisée, la quantification évoluera grâce à un facteur de pondération "k", utilisé si nécessaire. Les travaux de [Morton et al. \(1996\)](#) en course à pied, [Candau et al. \(1992\)](#) en ski de fond ou encore [Mujika et al. \(1996\)](#) en natation, utilisent un facteur de pondération $Y = e^{bx}$ dont la valeur est liée à l'augmentation exponentielle de $[La]_{sg}$ en fonction de l'intensité de l'exercice. En haltérophilie, [Busso et al. \(1991\)](#) utilisent le produit du nombre de répétitions par le pourcentage de 1-RM. Au lancer du marteau [Busso et al. \(1994\)](#) appliquent des coefficients en fonction du type d'entraînement effectué. Les travaux de [Morin et al. \(2014\)](#) recensent les études ayant utilisées cette forme de modèle dans l'optique de prédiction de la performance. A travers des activités comme la natation ([Calvert et al., 1976](#); [Chatard et Wilson, 2003](#)), le marathon ou le triathlon ([Millet et al., 2002](#); [Morton et al., 1990](#); [Wallace et al., 2014](#)) ou encore les sports de force comme l'haltérophilie ou le lancer du marteau ([Busso et al., 1994, 1991](#)), les études relatent des niveaux de corrélations (r) compris entre 0.60 et 0.98, entre la performance prédite et la performance réalisée. Dans certains cas, les auteurs de ces études proposent des versions adaptées du modèle initial. En effet, [Busso et al. \(1991\)](#) montrent qu'un modèle simplifié n'intégrant pas les composantes de la fatigue permet de prédire la performance chez des débutants. Idem pour [Wallace et al. \(2014\)](#) qui indiquent que les modèles à 2 composantes ne présentent une plus grande significativité que pour la partie course chez des triathlètes élités. [Morton et al. \(1996\)](#) proposent un modèle "simplifié" où une seule constante d'aptitude est utilisée. Néanmoins, ces auteurs ont intégré une variable représentant le temps écoulé entre 2 séances. Ils proposent ainsi une nouvelle équation :

$$p(t) = k_1 \times g(t) - k_2 \times h(t)$$

$p(t)$ représente la performance à un instant t . $g(t)$ symbolise la composante d'aptitude. $h(t)$ représente la composante fatigue. k_1 et k_2 sont des constantes permettant d'ajuster le modèle par itération. Les composantes d'aptitude et de fatigue sont définies de la façon suivante :

$$g(t) = g(t - i) \times e^{\frac{-i}{\tau_1}} + w(t)$$

$$h(t) = h(t - i) \times e^{\frac{-i}{\tau_2}} + w(t)$$

t représente le temps en jour. i représente le nombre de jours entre 2 séances. τ_1 et τ_2 sont les constantes de temps respectives de l'aptitude et de la fatigue. $w(t)$ est la charge de travail physique. Busso et al. (1997) insèrent également un paramètre de pondération induisant une baisse exponentielle des effets de la charge de travail au fil du temps (Figure 1.38). Une plus grande importance est ainsi attribuée aux séances récentes, reflétant l'évolution des réponses adaptatives à l'entraînement au cours de la période de pratique (Taha et Thomas, 2003). Les coefficients de détermination (R^2) apparaissent supérieurs pour le modèle évoluant au cours du temps ($R^2 = 0.88$ pour le modèle variant au cours du temps contre seulement $R^2 = 0.68$ pour le modèle fixe dans le temps).

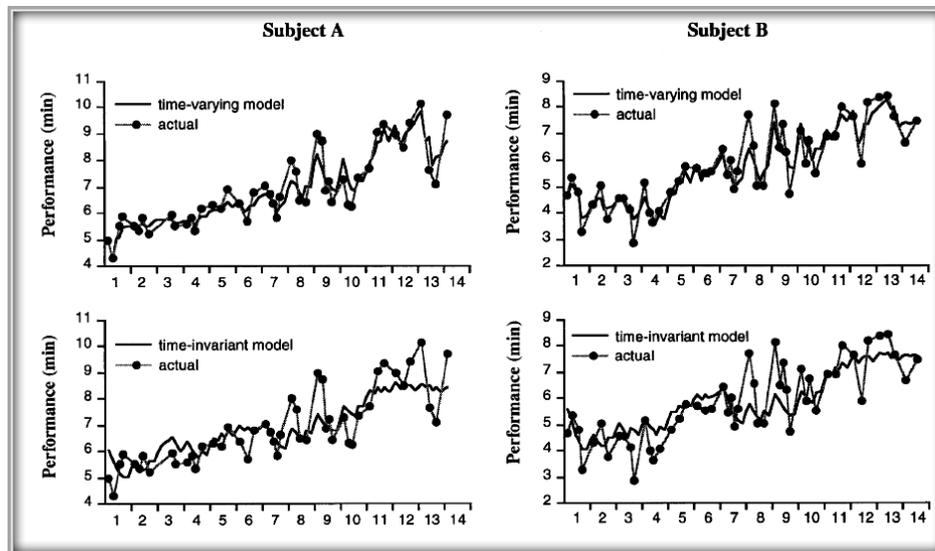


FIGURE 1.38 – Comparaison, par rapport à la performance "réelle" (actual), de deux types de modèle de prédiction de la performance à partir de la charge de travail. L'un des modèles évolue au cours du temps : time-varying model. L'autre modèle est fixe dans le temps : time-invariant model. Etude réalisée chez 2 sujets au cours de 14 semaines d'entraînement sur cyclo-ergomètre. D'après Busso et al. (1997).

Pour l'ensemble de ces constantes, il convient tout d'abord d'adapter le modèle aux capacités individuelles d'adaptation et de récupération du sportif, en fonction de l'âge, du

niveau de pratique et de l'activité concernée (Taha et Thomas, 2003). Parmi les études qui se sont intéressées à CE, la grande majorité d'entre elles concernait des sports individuels, où le mode de compétition est bien différent de celui des sports collectifs. La problématique concerne les variables et les méthodes pertinentes à prendre en considération de part la complexité de certains types d'effort. Enfin, l'organisation d'une saison de compétition, au plus haut niveau de sport collectif en Europe, repose sur l'enchaînement de compétitions hebdomadaires (voire bi-hebdomadaires), qui rend les modèles présentés ci-dessus inadaptés pour prédire une performance. De plus, une des difficultés majeures réside dans la complexité à définir la performance en sport collectif, tant les composantes technico-tactiques et stratégiques occupent une part inquantifiable dans la performance finale. Les récents travaux de Vanrenterghem et al. (2017) ouvrent peut-être une voie intéressante dans ce domaine. Ces auteurs proposent, en effet un cadre théorique en considérant le concept "dose-réponse" séparément pour les contraintes physiologiques d'un côté (DTP et DE pour CE_{ext} et $\dot{V}O_2$, $[La]_{sg}$, RPE pour CE_{int}) et les contraintes biomécaniques de l'autre (accélérations/décélérations, puissance mécanique, PlayerLoad™ et BodyLoad™ pour CE_{ext} et les dommages musculaires et la perception de la demande musculaire pour CE_{int}).

Les sessions RPE (sRPE)

Les marqueurs nécessaires afin de quantifier CE_{int} , et le temps d'analyse des données, représentent souvent des obstacles importants pour le suivi individuel des joueurs d'une équipe de sport collectif. Afin d'estimer l'intensité de l'effort, sans avoir recours à des marqueurs comme $[La]_{sg}$ (Mujika et al., 1996), FC (Edwards, 1993) ou la vitesse (Hayes et Quinn, 2009), Foster et al. (1996) proposent de multiplier la durée de l'effort (en minutes) par la perception de celui-ci pour obtenir une "sRPE", exprimée en unité arbitraire (UA). La méthode sRPE est probablement la plus utilisée pour quantifier CE_{int} . Elle est basée sur le principe de la perception subjective de l'effort qui peut représenter un bon indicateur au regard des réponses physiologiques de l'organisme pendant l'effort (Borg et Borg, 1987). Le sportif doit relater la sensation de difficulté de séance perçue dans les 30 min qui suivent la fin de séance. L'ensemble des séances quotidiennes et hebdomadaires sont alors sommées pour représenter CE quotidienne et hebdomadaire des sportifs. Cette méthode se distingue par sa simplicité d'utilisation, par le fait qu'elle n'induit aucun coût et de part sa capacité à représenter un indicateur commun de charge d'entraînement pour différents types de séance. En effet, son utilisation a été validée pour des séances de musculation (Day et al., 2003) tout comme des efforts de course à pied (Herman et al., 2006). Cette méthode a également été validée pour des sports à collisions comme le football canadien (Clarke et al., 2013) et le rugby à XIII (Coutts et al., 2007). Elle présente, dans les

études précédentes, des coefficients de corrélation (r) significatifs (entre 0.41 et 0.97 - $p < 0.05$) avec d'autres méthodes de quantification de la CE_{int} basées sur FC comme les *training impulse* (TRIMP) que nous aborderont un peu plus loin dans ce chapitre. A partir de sRPE il est possible de calculer les indices de contrainte et de monotonie représentant (en partie) la place de la récupération dans le mésocycle étudié (généralement mésocycle de 7 jours) (Foster, 1998). L'objectif des auteurs est de déterminer une stratégie optimale de charge afin de prévenir les risques de surentraînement et de blessures. La monotonie est un indicateur de la variabilité de l'entraînement. Elle est obtenue en divisant sRPE quotidienne moyenne des jours constituant le mésocycle, par l'écart-type de ces mêmes données. Les auteurs notent que problèmes de santé surviennent souvent lorsque les indices de monotonie et de contrainte atteignent des valeurs très élevées : 84% des maladies étaient précédés d'un pic de charge d'entraînement; 77% étaient précédées d'un pic de monotonie. La monotonie est obtenue en divisant sRPE quotidienne moyenne des jours constituant le mésocycle, par l'écart-type de ces mêmes données. La contrainte est obtenue en multipliant la somme des sRPE des différents jours du mésocycle à l'indice de monotonie obtenu. A partir de ce calcul, Foster (1998) montre que le risque de blessures augmente lorsque ces deux indices sont élevés. Les auteurs proposent alors de quantifier un score de "fitness" en soustrayant la contrainte à sRPE hebdomadaire. La plus value de cette méthode réside dans l'intérêt qu'elle porte à la variabilité de l'entraînement. En revanche, ses limites, tiennent au fait que son approche ne prend pas en compte les variations d'entraînement au sein d'une même semaine, permettant d'avoir une CE identique quelque soit l'enchaînement des séances. Grappe et al. (1999) propose une méthode simple de quantification de la charge d'entraînement en cyclisme. Le volume et l'intensité nécessaires pour le calcul sont déterminés en fonction respectivement, de la durée de l'exercice et d'une échelle d'Estimation Subjective de l'Intensité de l'Exercice (ESIE) composée de 7 items L'échelle comporte sept zones d'intensités identifiées par des repères caractéristiques et des perceptions spécifiques au cyclisme. La quantification de la CE à partir de l'ESIE est représentative de l'effort fourni par le coureur (Grappe, 2005). Certains auteurs proposent aussi de quantifier la difficulté de l'effort, non pas d'un point de vue global comme pour la sRPE, mais en la dissociant selon différents paramètres tels que l'effort cardio-respiratoire et l'effort musculaire (Los Arcos et al., 2014). L'effort musculaire peut également être précisé en séparant le haut et le bas du corps. Avec cette méthode on peut également intégrer les dimensions cognitives et techniques (McLaren et al., 2016; Weston et al., 2015). La proportion relative de ces formes différenciées de RPE varie selon les types de séance. McLaren et al. (2016) montrent que les perceptions de l'effort liées aux aspects cardio-respiratoire et musculaire, en particulier des membres inférieurs, sont significativement plus élevées lors des séances de travail physique. Ces auteurs montrent également que les séances de musculation induisent des perceptions de difficulté d'ef-

fort plus élevées pour les différents indicateurs d'effort musculaire en fonction de la zone corporelle impliquée dans la séance, tandis que les séances de développement technique présentent une dimension cognitive et psychomotrice plus importante (Figure 1.39).

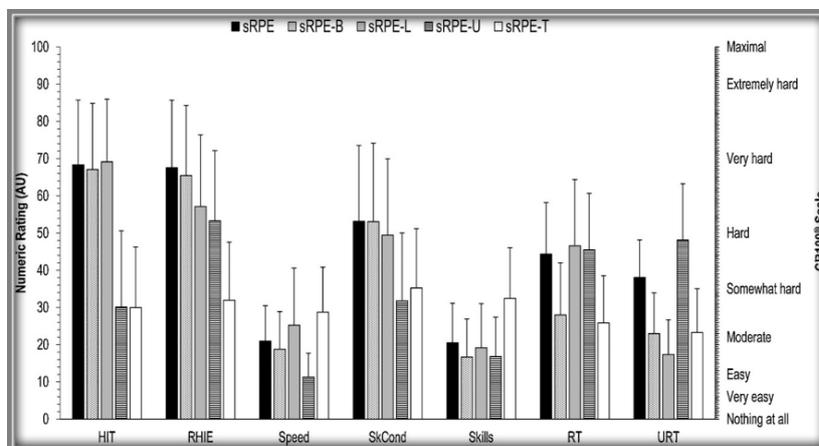


FIGURE 1.39 – Les indicateurs diversifiés de la perception de l'effort en fonction des différents types de séances chez des rugbymen professionnels.

sRPE : Perception d'effort de la séance; sRPE-B (breathlessness : cardio-respiratoire); sRPE-L (L= Leg : efforts musculaires des membres inférieurs); sRPE-U (U = Upper-body : efforts musculaires des membres supérieurs); sRPE-T (T = technique); HIT : entraînement par intervalles à haute intensité; RHIE : Entraînement à répéter des efforts de haute intensité; Speed : travail de vitesse; SKcond : travail de préparation physique intégrée; Skills : travail technique ou situation technico-tactique simple; RT : travail de musculation de tout le corps; URT : travail de musculation des membres supérieurs. (McLaren et al., 2016).

Les travaux d'Impellizzeri et al. (2004) comparent CE, sRPE et CE Edwards chez des footballeurs sur 7 semaines d'entraînement à raison de 3 à 4 séances par semaine. Les résultats montrent que les 2 méthodes suivent la même évolution de CE et qu'il existe une bonne corrélation ($r = 0.71$, $p < 0.001$) entre les 2 méthodes.

Le Training Impulse (TRIMP)

Développée par Banister et al. (1975), le concept de TRIMP tente de quantifier le stress physiologique d'une séance d'entraînement en prenant en compte son volume (la durée de la séance) et son intensité (FC moyenne de la séance). Les TRIMP sont exprimés en unités arbitraires (UA).

$$\text{TRIMP} = \text{durée de la séance (min)} \times \%FC_{max}$$

$\%FC_{max}$ (ou réserve) représente FC moyenne de la séance rapportée à FC_{max} ou FC de réserve. $FC_{réserve} = FC_{max} - FC$ au repos.

Morton et al. (1996) proposent un autre modèle afin de corriger le biais lié aux entraînements de longue durée concomitants d'un faible niveau de FC. Ils utilisent un coefficient pondérateur $Y = e^{bx}$:

$$Y = e^{b \frac{FC_{exe} - FC_{rep}}{FC_{max} - FC_{rep}}}$$

Y représente la valeur de TRIMP. b prend des valeurs différentes selon le sexe et e représente l'exercice. De part la différence de réponse à l'exercice entre les hommes et les femmes, Morton et al. (1996) proposent de différencier les valeurs de b , avec respectivement 1.92 pour les hommes et 1.67 pour les femmes :

$$TRIMP = \text{durée} \frac{FC_{moy.exe} - FC_{rep}}{FC_{max} - FC_{rep}} e^{1,92 \frac{FC_{moy.exe} - FC_{rep}}{FC_{max} - FC_{rep}}}$$

$$TRIMP = \text{durée} \frac{FC_{moy.exe} - FC_{rep}}{FC_{max} - FC_{rep}} e^{1,67 \frac{FC_{moy.exe} - FC_{rep}}{FC_{max} - FC_{rep}}}$$

Afin de palier à l'approche trop globale liée au calcul de TRIMP à partir de FC_{moy} , les travaux d'Edwards (1993) reprennent le modèle de Banister en déterminant 5 zones de travail (de 1 à 5) (Table 1.16) déterminées par rapport à FC_{max} théorique. Ce modèle consiste à multiplier le temps passé (en minutes) dans différentes zones de FC (50-60%; 60-70%; 70-80%; 80-90%; 90-100% de FC_{max}) à un facteur propre à chaque zone d'intensité (de 1 à 5, respectivement pour chacune des zones présentées ci-dessus). Le score de la séance est alors représenté par la somme des produits de la séance.

TABLEAU 1.16 – Zones d'intensité en relation avec FC_{max} (Edwards, 1993).

Zone	FC	Zone	Coefficient
1	50-60%	Aisance cardiaque	1
2	60-70%	Zone modérée	2
3	70-80%	Zone aérobie	3
4	80-90%	Seuil anaérobie	4
5	90-100%	Zone rouge	5

FC : fréquence cardiaque.

Les travaux de Lucia et al. (2003), s'intéressant à l'activité cyclisme, simplifient encore le modèle avec 3 zones référencées (Zone 1 avec une FC <SV1, une zone 2 où FC est comprise entre SV1 et SV2 et enfin une zone 3 où FC est > SV2). Stagno et al. (2007) observent, au cours d'une saison chez des joueurs de football anglais évoluant en 1^{re} division, des relations linéaires significatives ($p < 0.05$) entre la charge d'entraînement hebdomadaire calculée à partir de TRIMP modifié (zones définies par corrélations entre FC et $[La]_{sg}$)

et l'évolution de $\dot{V}O_{2max}$ ($r = 0.80$) d'une part, et l'évolution de la vitesse de course à 4 mmol.l^{-1} de $[La]_{sg}$ ($r = 0.71$) d'autre part. Les relations mathématiques entre ce type de modèles et la variation des performances (Busso et al., 1994, 1991) prouvent qu'ils permettent de décrire une réalité physiologique. Enfin, la concentration de $[La]_{sg}$ peut-être utilisée afin d'établir un coefficient pondérateur pour le calcul de CE. Les travaux de Mujika et al. (1996) permettent d'appliquer un facteur de pondération pour chaque zone d'intensité, reflétant les relations entre $[La]_{sg}$ et l'intensité et la durée de l'exercice (mesurées au préalable à différentes vitesses) (Mujika et al., 1996) (Tableau 1.17). Cependant, il existe des limites potentielles à son monitoring pendant l'exercice comme le niveau de température ambiante, le niveau d'hydratation, l'alimentation, la réserve en glycogène, la masse musculaire sollicitée, l'exercice précédent et le type de prélèvements (temps et site) (Borresen et Lambert, 2009).

TABLEAU 1.17 – Facteurs de pondération pour chaque zone d'intensité d'entraînement (Mujika et al., 1996).

Zone	Lactatémie	Coefficient
1	$[La] < 2 \text{ mM}$	1
2	$2\text{mM} < [La] < 4 \text{ mM}$	2
3	$4\text{mM} < [La] < 6 \text{ mM}$	3
4	$6\text{mM} < [La] < 10 \text{ mM}$	5
5	$[La] > 10 \text{ mM}$	8

Il apparaît donc intéressant de connaître les avantages et limites de chacun de ces modèles afin de mieux les utiliser. Alexiou et Coutts (2008) ont comparé les méthodes de sRPE, de TRIMP de Banister et du modèle dérivé d'Edwards chez des footballeuses de haut niveau. Les résultats de cette étude montrent des niveaux de corrélation correspondant à 0.85 et 0.86 ($p < 0.01$) avec la méthode des sRPE pour l'ensemble des séances. Les auteurs précisent que ces corrélations sont observées pour les séances orientées sur des efforts aérobies continus. Néanmoins, l'ensemble de ces méthodes de quantification de CE_{int} apparaissent extrêmement corrélées ($r = 0.92-0.98$) (Clarke et al., 2013) (Figure 1.40).

Au regard de tous ces modèles, il convient de garder à l'esprit que pour beaucoup d'entre eux le calcul de CE_{int} fait intervenir FC. Dans leur revue de littérature, Achten et Jeukendrup (2003) montrent que la fiabilité et la précision du cardiofréquencemètre se sont considérablement améliorées avec le temps, permettant des relevés d'information de plus en plus fiables. Néanmoins, les valeurs de FC à l'effort peuvent être influencées par plusieurs facteurs comme la déshydratation (Saltin, 1964) ou encore l'inertie du système cardio-vasculaire qui entraîne une sous estimation de FC pour les exercices intenses et inférieurs à 30 secondes (Bosquet et al., 2008).

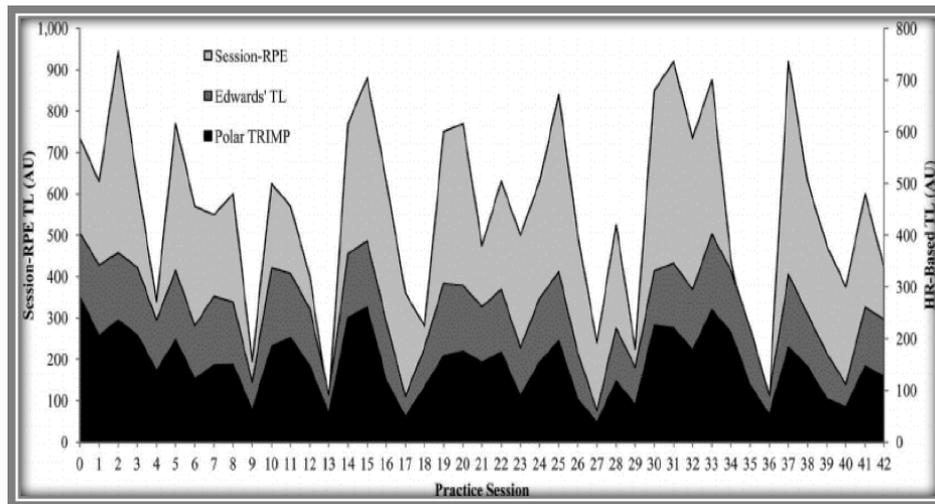


FIGURE 1.40 – Comparaison de différentes méthodes de quantification de la charge d’entraînement lors de différentes séances de football canadien (Clarke et al., 2013).

Les questionnaires et échelles d’intensité perçue

L’estimation de l’intensité d’effort perçue par le sportif, qui servira de calcul pour CE_{int} , peut également se faire à partir de marqueurs perceptifs faciles à mettre en place et peu coûteux. L’échelle la plus connue est celle de Borg (1970), notée de 6 à 20 qui a servi de base à de nombreuses autres échelles. Il existe une variante de cette échelle avec 10 items (CR10) (Foster et al., 2001) (Tableau 1.18) qui semble présenter de bonnes corrélations avec FC ($r = 0.65$) (Grappe, 2012).

TABEAU 1.18 – Echelle originelle de Borg (1970) et échelle modifiée (Foster et al., 2001) de la perception de l’effort.

Echelle originelle (Borg, 1970)	Perception de l'effort	Echelle CR ₁₀ (Borg, 1987)	Perception de l'effort
6		0	Repos
7	Repos		
8		1	Très, très facile
9	Très, très facile		
10		2	Facile
11	Très facile		
12		3	Modéré
13	Facile		
14	Effort modéré	4	Un peu dur
15	Moyen	5	Dur
16	Un peu dur	6	
17	Dur	7	Très dur
18	Très dur	8	
19	Très, très dure	9	
20	Maximal	10	Maximal

Afin de suivre l'évolution des adaptations physiologiques et/ou psychologiques des sportifs, il semble intéressant d'utiliser des questionnaires (Cresswell et Eklund, 2006; Favre-Juvin et al., 2003), en complément d'autres marqueurs, pendant une période d'entraînement ou de compétition. Les questionnaires sont parmi les outils les plus régulièrement utilisés. Ils ont l'avantage d'être peu coûteux et d'être faciles à mettre en place. Ils caractérisent la perception qu'a un sportif de son bien-être, de sa fatigue, de la qualité de son sommeil, de son état psychologique (anxiété, dépression, motivation...). Certaines études soutiennent l'hypothèse selon laquelle l'approche la plus pertinente pour quantifier l'intensité de l'effort physique est de se fier au ressenti de l'athlète (Hooper et al., 1995; Urhausen et Kindermann, 2002). L'altération d'un de ces paramètres peut montrer que le sportif a dépassé ses capacités d'adaptation en réponse à la CE à laquelle il a été soumis, ce qui est susceptible de le conduire vers un état de surentraînement (Halson et al., 2002). Saw et al. (2016) montrent que les mesures subjectives (celles des questionnaires) et objectives du bien-être et de l'état de forme ne sont pas corrélées. Ces auteurs montrent que les données rapportées subjectivement présentent un plus haut niveau de sensibilité et de variabilité que les mesures objectives, notamment en phase intensive d'entraînement. En France, le questionnaire de la société française de médecine du sport (QSFMS) a été proposé pour détecter un état de fatigue ou de surentraînement (Legros et al., 1993; Maso et al., 2005). En répondant par "oui" ou "non" à 54 items, ce questionnaire permet d'estimer un état de surentraînement si le score total est supérieur à 20 "oui" (Tableau 1.19).

Le POMS (McNair et al., 1971), profile des états d'humeur (McNair et al., 1971), permet d'étudier les variations de l'état d'esprit et de l'humeur, au cours d'une période donnée. Au travers de 65 questions réparties selon des critères liés à l'anxiété, la dépression, la colère, la vigueur, la fatigue et la confusion, le POMS détermine un score en fonction des réponses à des mots clés décrivant chaque état. Pour chaque mot clé, l'athlète doit décrire dans quelle mesure il l'a ressenti. Le POMS permet de définir un profil optimal avec des scores bas sur les états négatifs (anxiété, dépression, colère, fatigue et confusion) et un score haut sur la vigueur. Un autre questionnaire, le recovery-stress questionnaire (REST-Q) (Kellmann et Kallus, 2001) est assez peu utilisé dans le domaine sportif. Il permet d'identifier un potentiel déséquilibre entre le stress physiologique et ses effets sur l'athlète. 7 items évaluent le stress général (bien-être, perception sociale ...), 3 quantifient le stress sportif spécifique et 4 autres mesurent les sentiments de récupération. Ce questionnaire est utilisé dans des études qui observent les répercussions, sur ses différents items, de périodes de compétition intenses et/ou prolongées (Coutts et Reaburn, 2008; Hartwig et al., 2008). Ce questionnaire est présenté comme un moyen de prévenir les états de surcharge, susceptibles d'être non-fonctionnels, durant une période de compétition. Enfin, le questionnaire de Hooper (Hooper et al., 1995) est basé sur l'auto-analyse de 4 critères, à savoir la fatigue, les douleurs musculaires, le stress et la qualité du

TABLEAU 1.19 – Questionnaire à 54 items de la SFMS.

1	Mon niveau de performance sportive/mon état de forme a diminué	OUI	NON
2	Je ne soutiens pas autant mon attention	OUI	NON
3	Mes proches estiment que mon comportement a changé	OUI	NON
4	J'ai une sensation de poids sur la poitrine	OUI	NON
5	J'ai une sensation de palpitation	OUI	NON
6	J'ai une sensation de gorge serrée	OUI	NON
7	J'ai moins d'appétit qu'avant	OUI	NON
8	Je mange davantage	OUI	NON
9	Je dors moins bien	OUI	NON
10	Je somnole et baille dans la journée	OUI	NON
11	Les séances me paraissent trop rapprochées	OUI	NON
12	Mon désir a diminué	OUI	NON
13	Je fais de contre-performances	OUI	NON
14	Je m'enrhume fréquemment	OUI	NON
15	J'ai des problèmes de mémoire	OUI	NON
16	Je grossis	OUI	NON
17	Je me sens souvent fatigué	OUI	NON
18	Je me sens en état d'infériorité	OUI	NON
19	J'ai des crampes, douleurs musculaires fréquentes	OUI	NON
20	J'ai plus souvent mal à la tête	OUI	NON
21	Je manque d'entrain	OUI	NON
22	J'ai parfois des malaises ou des étourdissements	OUI	NON
23	Je me confie moins facilement	OUI	NON
24	Je suis souvent patraque	OUI	NON
25	J'ai plus souvent mal à la gorge	OUI	NON
26	Je me sens nerveux, tendu, inquiet	OUI	NON
27	Je supporte moins bien mon entraînement	OUI	NON
28	Mon coeur bat plus vite qu'avant au repos	OUI	NON
29	Mon coeur bat plus vite qu'avant à l'effort	OUI	NON
30	Je suis souvent mal fichu	OUI	NON
31	Je me fatigue plus facilement	OUI	NON
32	J'ai souvent des troubles digestifs	OUI	NON
33	J'ai envie de rester au lit	OUI	NON
34	J'ai moins confiance en moi	OUI	NON
35	Je me blesse facilement	OUI	NON
36	J'ai plus de mal à rassembler mes idées	OUI	NON
37	J'ai plus de mal à me concentrer dans mon activité sportive	OUI	NON
38	Mes gestes sportifs sont moins précis, moins habiles	OUI	NON
39	J'ai perdu de la force, du punch	OUI	NON
40	J'ai l'impression de n'avoir personne de proche à qui parler	OUI	NON
41	Je dors plus	OUI	NON
42	Je tousse plus souvent	OUI	NON
43	Je prends moins de plaisir à mon activité sportive	OUI	NON
44	Je prends moins de plaisir à mes loisirs	OUI	NON
45	Je m'irrite plus facilement	OUI	NON
46	J'ai une baisse de rendement dans mon activité scolaire ou professionnelle	OUI	NON
47	Mon entourage trouve que je deviens moins agréable à vivre	OUI	NON
48	Les séances sportives me paraissent trop difficiles	OUI	NON
49	C'est ma faute si je réussis moins bien	OUI	NON
50	J'ai les jambes lourdes	OUI	NON
51	J'égare plus facilement les objets (clefs, etc..)	OUI	NON
52	Je suis pessimiste, j'ai des idées noires	OUI	NON
53	Je maigris	OUI	NON
54	Je me sens moins motivé, j'ai moins de volonté, moins de ténacité	OUI	NON

sommeil, notés de 1 à 7. Ce test simple et rapide à mettre en place, permet de prélever des indices pertinents dans le suivi de CE sur un groupe important d'athlètes. Tous ces questionnaires représentent souvent une des premières étapes dans le suivi de l'état de forme. Il est important de comparer les résultats intra individuellement car la dimension psychologique est une variable importante qui influence la perception des sensations et par conséquent les résultats à ces questionnaires. Il faut néanmoins garder à l'esprit qu'ils permettent le suivi d'un groupe de sportif restreint et qu'ils demeurent plus difficiles à utiliser dans les sports collectifs.

Pour palier à cette problématique d'encadrement de plusieurs sportifs en même temps, comme en sport collectif, certaines solutions apparaissent dans le milieu du sport. Les travaux de [Morin et al. \(2014\)](#), par exemple, ont permis de mettre en place un système informatique ergonomique afin de mieux appréhender l'entraînement et ses répercussions. A partir d'une modélisation mathématique, le logiciel Training Load Pro présente une régulation générale induite par les stimuli d'entraînement. Il part du principe que pour un sportif, une même séance d'entraînement, à différentes périodes, ne produit pas les mêmes adaptations ([Avalos et al., 2003](#)). Le principe de ce système réside dans le fait que les sportifs saisissent leurs perceptions qui sont immédiatement stockées en base de données sur un serveur et transférées par email avec un fichier attaché. A partir d'une échelle visuelle analogique, les sportifs répondent librement grâce à une réglette munie d'un curseur mobile (Figure 1.41).

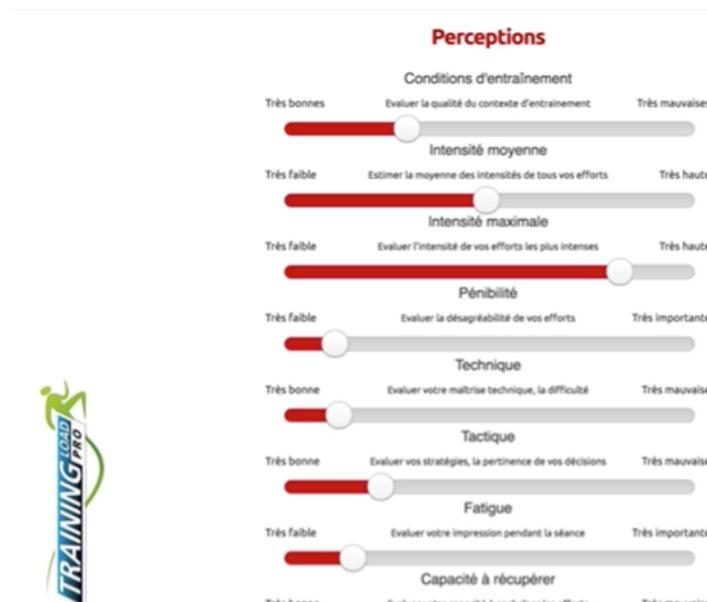


FIGURE 1.41 – Formulaire de saisie du logiciel Training Load Pro.

A travers les solutions présentées ci dessus, nous avons utilisé le questionnaire de Hooper et al. (1995) dans le cadre de notre étude.

1.6.2.2 Etat de l'art

Les différentes méthodes de quantification de CE_{int} servent à étudier l'effet "dose / réponse" de l'entraînement. Elles permettent de percevoir et de préciser l'influence du volume, de l'intensité et de la fréquence des entraînements sur (i) les risques de blessure (Brooks et al., 2008; Gabbett et Domrow, 2007; Gabbett et Jenkins, 2011; Rogalski et al., 2013), (ii) l'évolution des performances (Akubat et al., 2012; Gastin et al., 2013) et (iii) l'évolution de l'état santé et/ou du bien-être général des athlètes. Certains auteurs tentent d'établir une relation dose/réponse entre CE_{int} et l'évolution des performances physiques. Les travaux de Suzuki et al. (2006) se sont intéressés à l'utilisation de RPE dans la programmation de l'entraînement d'un athlète spécialiste de sprint (400 m). Les résultats de cette étude montrent que le modèle est statistiquement prédictif ($r = 0.83$ et $p < 0.001$) de la performance. Brink et al. (2010) ont étudié les relations entre RPE et les résultats à un test navette réalisé tous les mois. RPE était mesurée en conditions d'entraînement et de compétition chez 18 jeunes joueurs de football et sur une saison complète (32 semaines). CE_{int} était calculée à partir de RPE et d'un indice de récupération (échelle TQR : total quality of recovery) (Kentta et Hassmen, 1998). Les résultats de cette étude montrent qu'en moyenne les joueurs percevaient comme " dur " l'ensemble des séances (14.4 ± 1.2) et comme " bonne " leur qualité de récupération (14.7 ± 1.3). Toutefois, au regard de l'influence de CE_{int} sur la performance au test navette sous-maximal, Brink et al. (2010) montrent que RPE et TQR ne sont pas prédictifs d'une performance. Dans leur étude, Scott et al. (2013b) comparent les méthodes sRPE et CR10 chez des joueurs de football Australiens. Les résultats de cette étude montrent une corrélation importante entre sRPE et la méthode des TRIMP ($r = 0.83$, $p < 0.05$). Les auteurs concluent que sRPE est une méthode valable pour quantifier CE_{int} dans les sports d'équipe intermittent à haute intensité. Clarke et al. (2013), ont comparé la méthode sRPE, la méthode des TRIMP et la méthode d'Edwards (1993). Cette étude réalisée chez des footballeurs universitaires Canadien montre des corrélations significatives ($r = 0.65 - 0.91$) entre sRPE et TRIMP et également entre sRPE modèle d'Edwards ($r = 0.69 - 0.91$). Clarke et al. (2013) concluent que sRPE peut-être un outil simple qui mesure avec précision CE_{int} . Casamichana et al. (2013), à partir de 44 entraînements de joueurs de football semi-professionnels, ont mesuré CE_{ext} à l'aide d'un système GPS et CE_{int} à l'aide de moniteurs de FC et de sRPE. Les résultats de cette étude montrent l'intérêt du suivi de CE_{int} avec l'outil sRPE dans le football. Johnston et al. (2013) étudient la diminution des performances physiques, à travers des données GPS de DTP, lors d'une période de compétition intense chez des rugbymen adolescents. Ces auteurs montrent une diminution (i) des DTP à des vitesses importantes et (ii) de la capacité à répéter des efforts. Ils montrent également une augmentation de la difficulté perçue des matches au fur et à mesure des 5 jours de compétition.

Dans la littérature scientifique, peu de travaux se sont intéressés à CE en handball. Une des premières études est certainement celle de [Gorostiaga et al. \(2006\)](#) au cours de laquelle des joueurs Espagnols de haut niveau ont été suivis sur une saison complète. Les auteurs ont étudié l'effet d'une saison sportive, comprenant 45 semaines, sur la condition physique (tests de force et de puissance musculaire, de vitesse de course, d'endurance et de vitesse de tir) des joueurs. Les résultats de cette étude montrent qu'une saison de handball, effectuée au plus haut niveau, entraîne des augmentations significatives de la force mesurée au niveau du haut du corps. En revanche, au cours de cette étude les auteurs n'ont pas estimé CE_{int} . Plus récemment, les travaux de [Bresciani et al. \(2010\)](#) se sont intéressés au suivi d'une équipe Espagnole de handball évoluant au niveau national. Cette étude a mesurée CE des joueurs sur toute la saison en multipliant la durée des entraînements et des matchs par le score à l'échelle RPE de Foster ([Foster et al., 2001](#)). Cette étude, d'une durée de 40 semaines, était répartie en plusieurs périodes : deux périodes de préparation à la compétition (PP1 et PP2), deux périodes de compétition (CP1 et CP2) et une période de récupération (RP). Les résultats de cette étude montrent que CE était statistiquement ($p < 0.05$) plus élevée au cours de la 2^e période de compétition (PP2), comparativement aux autres périodes (Tableau 1.20).

TABLEAU 1.20 – Répartition de CE sur l'ensemble de la saison de compétition en handball ([Bresciani et al., 2010](#)).

	PP1	CP1	PP2	CP2	RP
Duration (weeks)	5	14	3	11	7
Total training sessions	24	74	12	55	21
Mean sessions per week	4.8	5.3	4.0	5.0	3.0
Number of training games	8	0	0	0	4
Number of competitive games	0	13	0	11	0
Training load (arbitrary units)	1509 ± 285*#	2244 ± 273#	1911 ± 200#	2712 ± 292	1901 ± 400#

PP1 et PP2 : période de préparation ; CP1 et CP2 : période de compétition ; RP : période de récupération.

On l'a vu précédemment, les échelles d'état de forme peuvent également être des outils intéressants et simples à utiliser pour estimer l'état de forme de l'athlète. [Hooper et al. \(1995\)](#) montrent, chez des nageurs de niveau élite et sur une période de 6 mois, que les athlètes en " manque de fraîcheur " étaient associés à des scores plus élevés à son questionnaire portant sur les 4 items (sommeil, fatigue, stress et douleurs musculaires) que les autres nageurs (avec respectivement $r = 0.51$, $r = 0.64$, $r = 0.55$ et $r = 0.59$, avec $p < 0.05$). Pour les auteurs, ce questionnaire d'état de forme est un bon prédicteur du manque de fraîcheur. [Hooper et al. \(1997\)](#) montrent également, lors d'un suivi annuel de nageurs, que les scores relevés sur les items de " sommeil " et de " fatigue " de son questionnaire (index de Hooper) permettent de prédire une fatigue dès lors que les athlètes inscrivent une

note supérieure à 5, plus de 7 jours consécutifs. D'autres auteurs se sont intéressés aux variations d'états de forme au moyen de questionnaires en relation avec l'entraînement, et plus particulièrement CE. [Martin \(1990\)](#) montrent, chez des cyclistes, que le score de "fatigue", déterminé à partir du test de POMS sur des périodes d'une durée de 6 semaines, augmente avec l'augmentation de l'entraînement. En revanche, les auteurs rapportent que ni l'entraînement à haute intensité, ni la semaine d'affutage n'ont influencé le score total au POMS. Ces résultats vont dans le sens des travaux de [Bresciani et al. \(2010\)](#), qui n'ont pas montré de changements significatifs au score total du questionnaire de POMS malgré une évolution de CE chez des joueurs de handball durant une saison complète (Tableau 1.21).

TABLEAU 1.21 – Scores au test de POMS mesurés sur des joueurs de handball durant une saison entière ([Bresciani et al., 2010](#)).

	T1	T2	T3	T4	T5
Tension	5.6±6.4	7.1±6.4	6.6±13.8	4.4±4.5	5.4±4.7
Depression	7.8±9.5	7.9±10.0	13.9±12.0	7.6±8.8	8.9±7.6
Anger	8.7±6.9	11.6±10.7	14.1±10.1*	11.0±7.6	13.6±10.5
Vigour	19.1±3.8	18.9±5.3	19.1±5.1	20.6±4.4*	18.5±4.1
Fatigue	13.9±4.0	8.0±4.7	9.6±6.6	7.4±5.8	7.2±4.7
Confusion	2.4±4.7	3.0±5.1	3.9±5.2	1.8±5.1	2.5±3.0
Total Mood Disturbance	119.0±27.3	118.7±33.7	129.0±42.9	111.6±28.7	119.2±29.1

T1, T2, T3, T4, T5 : tests.

Tout comme pour les sports d'endurance, il semble qu'il existe une relation étroite entre les stress psychologiques et l'évolution des paramètres physiques et physiologiques dans les sports collectifs ([Akubat et al., 2012](#)). Cependant, l'influence des contraintes physiologiques durant une saison sportive (matches + entraînements) et l'évolution des performances physiques en compétition restent difficiles à appréhender, notamment dans le handball, avec des moyens humains et financiers encore restreints. Dès lors, il serait intéressant de pouvoir planifier l'entraînement en fonction de chaque athlète, de sa spécificité, de ses caractéristiques individuelles et de ses propres mécanismes d'adaptations. Pour cela, il semble important (i) de sélectionner les marqueurs les plus pertinents possibles et (ii) d'adapter le rythme d'entraînement à l'athlète et son environnement. Ceci permettrait de mieux contrôler les adaptations individuelles à l'entraînement afin d'anticiper le plus possible les états de méforme et les blessures.

1.6.3 Les dosages biologiques

Les perturbations de l'homéostasie induites par une pratique sportive intensive peuvent être étudiées via le dosage de composants hématologiques et de molécules circulantes par voie sanguine. A ce jour, environ 70 marqueurs ont été utilisés pour étudier le niveau de fatigue d'un sportif ([Snyder, 1998](#)). L'évolution de certains paramètres sanguins peut en

effet être associée à une diminution des performances neuromusculaires et/ou énergétiques qui atteste de l'impossibilité de l'organisme à s'adapter aux stimuli de l'entraînement. Cette incapacité suggère un déséquilibre entre le stress provoqué (volume, intensité, fréquence) par l'entraînement et la capacité du sportif à récupérer. On parle de déséquilibre entre l'anabolisme et le catabolisme métabolique, i.e., d'un état de fatigue aiguë ou chronique. En préambule de la présentation de certains des résultats de la littérature, il est important de préciser que leur interprétation est sujette à caution car de nombreux facteurs sont susceptibles de les faire varier comme, par exemple, (i) l'heure de prélèvement (surtout pour le $[C]_{sg}$), (ii) le statut nutritionnel précédant le prélèvement (pour $[C]_{sg}$ et l'hormone de croissance (GH)), (iii) l'absorption de toxiques ou de médicaments (pour $[C]_{sg}$ et $[T]_{sg}$) et l'Insulin-like Growth Factor-1 (somatomédine C (IGF-1)), hormone sécrétée par le foie qui influence le métabolisme cellulaire et (iv) la durée qui sépare le prélèvement sanguin du dernier effort physique réalisé (pour $[T]_{sg}$ et IGF-1) (Tremblay et al., 1995). De plus, de nombreuses études montrent qu'un marqueur comme $[C]_{sg}$ peut augmenter significativement (i) quelques heures avant une compétition (stress psychologique) et (ii) se prolonger jusqu'à 24 heures après (McLellan et al., 2010, 2011). Le stress provoqué par une compétition, comme le rugby ou le handball, comprenant des actions avec des contacts répétées ou des courses à haute intensité, induit d'importants dégâts musculaires, ainsi qu'une réponse inflammatoire et endocrinienne à l'origine d'une baisse du potentiel physique du sportif sur une période de 24 à 72h (Johnston et al., 2013; McLellan et al., 2010, 2011; Takarada, 2003; Twist et al., 2012). Certaines études se sont intéressées aux adaptations chroniques à l'entraînement en mesurant les variations de paramètres hématologiques, endocriniens ou hormonaux à l'échelle d'une période intensive de compétition, voire d'une saison (Banfi et al., 2006; Elloumi et al., 2008; Gorce-Dupuy et al., 2012; Lindsay et al., 2015). Des premiers travaux se sont intéressés à des paramètres biologiques comme les niveaux de $[T]_{sg}$, de $[C]_{sg}$ et le ratio $[T]/[C]$ (Fry et al., 1991). Paramètres assez révélateurs de l'équilibre entre l'anabolisme et le catabolisme, révélateurs de l'état de forme du sportif (Crewther et al., 2009; Elloumi et al., 2008; Gaviglio et al., 2014). Les travaux de Maso et al. (2004) se sont intéressés aux variations de $[T]_{sg}$ et de $[C]_{sg}$. Les résultats de cette étude montrent une augmentation significative de $[C]_{sg}$ sur l'ensemble de la saison ($p < 0.01$ entre le test 1 et le test 2, $p < 0.001$ entre le test 2 et le test 3 et $p < 0.0001$ entre le test 1 et le test 3). En ce qui concerne $[T]_{sg}$, il n'évolue que très peu, mise à part une diminution significative ($p < 0.01$) entre le test 1 et le test 2. Les résultats montrent une baisse significative du ratio $[T]/[C]$ sur l'ensemble de la saison ($p < 0.01$ entre le test 1 et le test 2 et entre le test 2 et le test 3 et $p < 0.001$ entre le test 1 et le test 3), en relation avec une augmentation significative de QSFMS au cours de la saison ($p < 0.01$ entre le test 1 et le test 2, $p < 0.001$ entre le test 2 et le test 3 et $p < 0.01$ entre le test 1 et le test 3). Ces résultats montrent également des corrélations significatives entre le score

obtenu au QSFMS, $[T]_{sg}$ ($r = -0.6$; $p < 0.01$) et le ratio $[T]/[C]$ ($r = -0.43$; $p < 0.05$). L'étude d'Elloumi et al. (2005) a été réalisée sur une période de 14 semaines (incluant des matchs de 1^{re} et 2^e division nationale et des matchs internationaux) chez 20 rugbymen tunisiens (Figure 1.42).

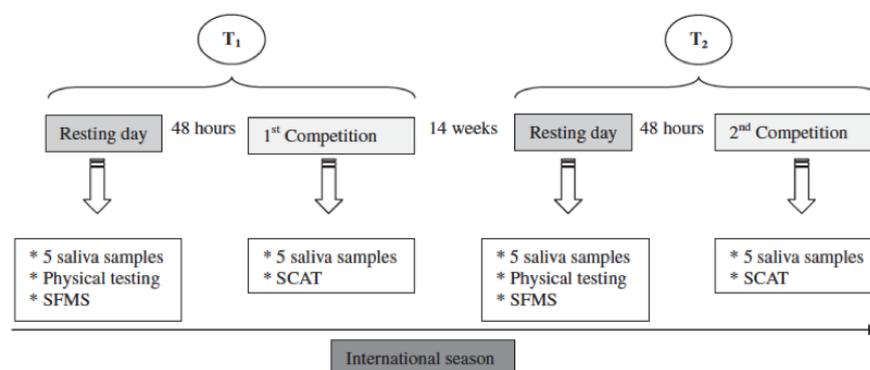


FIGURE 1.42 – Vue d'ensemble des évaluations réalisées au cours de l'étude d'Elloumi et al. (2008). SFMS : questionnaire de la société française de médecine du sport; SCAT : test d'anxiété de la pratique du sport en compétition. T1 : match 1 analysé en début de période internationale; T2 : match 2 analysé en fin de période internationale.

Les résultats de cette étude montrent des diminutions significatives ($p < 0.01$) pour $[T]_{sal}$ et ($p < 0.05$) pour le ratio $[T]/[C]_{sal}$ entre le début et la fin de ces 14 semaines (Figure 1.43).

Coutts et al. (2007) ont étudié, chez 18 joueurs australiens semi-professionnels de rugby, l'influence d'une surcharge progressive de 6 semaines d'entraînement séparées par de courtes périodes de récupération sur les qualités physiques d'endurance, de force et de puissance musculaire. $[T]_{sg}$, $[C]_{sg}$, le glutamate, la glutamine plasmatique ainsi que l'activité de la protéine créatine kinase plasmatique $[CK]_{sg}$ étaient mesurées au cours de cette étude. Les résultats montrent une réduction significative ($p < 0.05$) du ratio $[T]/[C]$ concomitante d'une élévation de l'activité de $[CK]_{sg}$. Ils concluent que les joueurs se trouvaient dans un état de catabolisme avec une élévation des dommages musculaires probablement due à une diminution de la balance anabolisme/catabolisme (Tableau 1.22)

Les résultats de l'étude de Coutts et al. (2007) sont en accord avec une partie de la littérature sur le rapport $[T]/[C]$ (Elloumi et al., 2003; Hartmann et Mester, 2000) qui montre qu'il peut être utile pour étudier les adaptations au stress provoqué par les entraînements et les matchs dans les sports collectifs. Les résultats de l'étude de Coutts et al. (2007) sont également en accord avec ceux de Twist et Highton (2013) qui indiquent, chez des rugbymen de niveau élite, que le ratio glutamine/glutamate est intéressant à utiliser pour dépister les états de surcharge (overreaching). Les travaux de Schelling et al. (2014) ont également porté sur le dosage de $[T]_{sg}$ et $[C]_{sg}$. A partir de 8 prélèvements effectués sur des basketteurs professionnels Espagnols sur l'ensemble d'une saison sportive, les au-

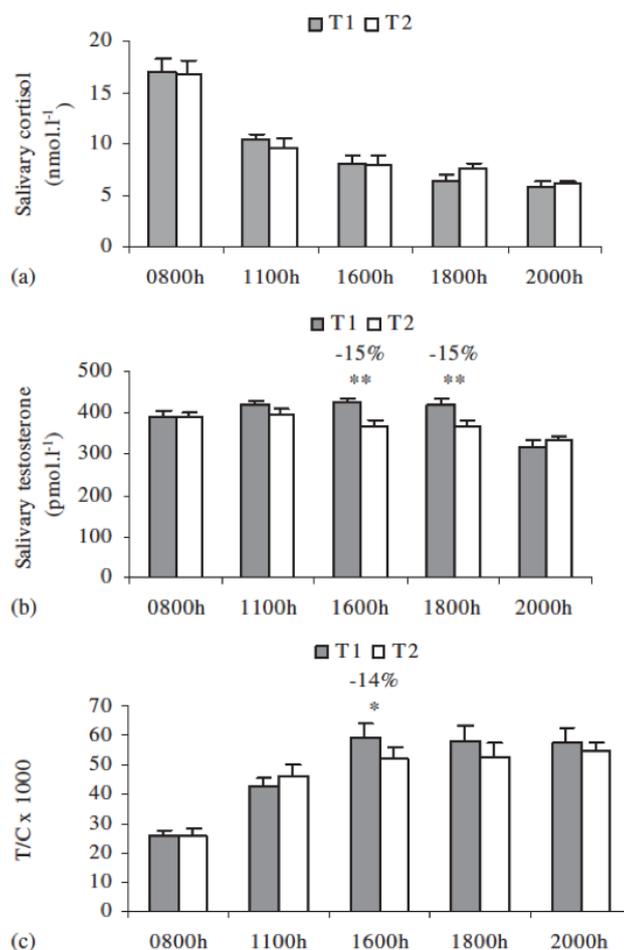


FIGURE 1.43 – Taux de concentration de cortisol et testostérone salivaires (moyenne et écart-type). (Elloumi et al., 2008).

T1 : match 1 analysé en début de période internationale; T2 : match 2 analysé en fin de période internationale. T/C : rapport testostérone sur cortisol salivaire.

Measure	Group	Pre-training	2 weeks	4 weeks	Post-training	Taper
Testosterone (ng dl ⁻¹)	IT	592 ± 149	643 ± 191	534 ± 71 ^{a,b}	479 ± 114 ^b	543 ± 137
	NT	582 ± 108	588 ± 94	583 ± 96	507 ± 125 ^b	531 ± 133
T/C ratio	IT	0.037 ± 0.001	0.038 ± 0.013	0.034 ± 0.013	0.027 ± 0.007 ^b	0.031 ± 0.009 ^b
	NT	0.033 ± 0.007	0.036 ± 0.013	0.033 ± 0.009	0.031 ± 0.017 ^b	0.039 ± 0.016 ^b
ACTH (pmol l ⁻¹)	IT	6.5 ± 3.6	7.9 ± 4.3	6.5 ± 2.9	8.1 ± 4.1	6.3 ± 3.6
	NT	10.0 ± 4.8	9.2 ± 4.8	8.1 ± 4.1	9.7 ± 6.4	9.2 ± 7.3
Cortisol (µg dl ⁻¹)	IT	21.3 ± 6.1	22.4 ± 4.3	21.9 ± 5.3	22.7 ± 4.1	22.2 ± 3.7
	NT	22.5 ± 4.7	23.2 ± 8.1	19.7 ± 5.2	22.5 ± 6.6	18.8 ± 6.38
Insulin (µU ml ⁻¹)	IT	5.6 ± 3.5	6.8 ± 2.1	5.4 ± 2.4	5.2 ± 1.7	7.8 ± 11.1
	NT	5.8 ± 1.6	7.2 ± 1.1	8.1 ± 2.1	6.5 ± 2.6	7.9 ± 3.3
Urinary ADR (nmol day ⁻¹)	IT	9.9 ± 7.8	18.1 ± 14.4	16.8 ± 10.9	32.6 ± 39.1	31.8 ± 33.8
	NT	24.1 ± 23.3	18.3 ± 12.6	15.0 ± 13.9	19.5 ± 11.4	19.0 ± 23.7
Urinary NA (nmol day ⁻¹)	IT	168 ± 69	205 ± 150	225 ± 125	278 ± 226	367 ± 214
	NT	225 ± 141	222 ± 123	206 ± 87	240 ± 95	158 ± 88

TABLEAU 1.22 – Variations des paramètres hormonaux pour des joueurs de rugby durant une période de 6 semaines (Coutts et al., 2007).

Valeurs en moyenne et écart-type; a : valeur significativement différente avec la mesure précédente; b : valeur significativement différente avec la mesure de pré-saison. IT : entraînement intense; NT : entraînement normal; T/C : ratio testostérone sur cortisol; ACTH : hormone cortico-trope; ADR : adrénaline; NA : noradrénaline.

teurs rapportent des diminutions significatives de $[T]_{sg}$ entre le mois de septembre et le mois d'avril ($p < 0.01$), entre le mois d'octobre et le mois d'avril ($p < 0.004$) et entre le mois de février et le mois d'avril ($p < 0.01$). En revanche, les auteurs n'observent pas de différences significatives de $[C]_{sg}$ et du rapport $[T]/[C]$ tout au long de la saison (Tableau 1.23). Ils montrent également que ces variations ne sont pas corrélées au temps de jeu. Les auteurs concluent que $[T]_{sg}$ peut être un marqueur intéressant pour objectiver l'état de forme du joueur à l'échelle d'une saison.

TABLEAU 1.23 – Prélèvements sanguins de testostérone et cortisol (Schelling et al., 2014).

	PRE-SEASON		REGULAR SEASON						p
	August	September	October	November	January	February	March	April	
TT (nMol/l)	21.0 ± 4.8	22.4 ± 4.2	22.9 ± 4.0	21.5 ± 4.5	21.4 ± 3.6	24.9 ± 2.9	20.6 ± 2.8	18.0 ± 3.7 ^{a,b,c}	p<0.01
VarTT (%)	0.0 ± 0.0	9.9 ± 22.9	11.8 ± 19.7	3.9 ± 15.2	4.8 ± 20.0	23.8 ± 30.3	1.1 ± 17.8	-12.2 ± 17.2 ^a	p>0.05
C (µMol/l)	0.399 ± 0.16	0.451 ± 0.08	0.439 ± 0.10	0.393 ± 0.13	0.438 ± 0.13	0.441 ± 0.09	0.441 ± 0.09	0.516 ± 0.06	p<0.01
VarC (%)	0.0 ± 0.0	33.3 ± 69.2	33.1 ± 83.0	18.7 ± 84.3	30.1 ± 80.5	35.6 ± 84.5	29.2 ± 64.8	57.4 ± 87.0	p>0.05 ^o
TT/C ratio	58.0 ± 17.7	50.8 ± 11.3	54.8 ± 17.1	61.7 ± 26.8	54.8 ± 26.6	58.4 ± 12.1	48.6 ± 13.6	35.4 ± 8.5	p>0.05 ^o
VarTT/C (%)	0.0 ± 0.0	-6.6 ± 28.5	1.4 ± 39.3	15.6 ± 59.0	3.3 ± 61.1	8.1 ± 35.6	-10.9 ± 32.4	-33.7 ± 24.0	p>0.05 ^o
Number of players with VarTT/C less than 0%									
VarTT/C < 0%	0	5 (62.5%)	5 (62.5%)	3 (37.5%)	5 (62.5%)	3 (37.5%)	6 (75%)	8 (100%)	
VarTT/C < -30%	0	1 (12.5%)	1 (12.5%)	1 (12.5%)	3 (37.5%)	2 (25%)	2 (25%)	4 (50%)	

TT : testostérone; varTT : pourcentage de variation de testostérone; C : cortisol; varC : pourcentage de variation de cortisol; TT/C : ratio testostérone sur cortisol; varTT/C : pourcentage de variation du ratio testostérone sur cortisol. Changements significatifs ($p < 0.05$) : ^a.vs.septembre; ^b.vs.octobre; ^c.vs.février.

Schelling et al. (2015) confirment les résultats de leur précédente étude lors d'une nouvelle étude réalisée sur 20 basketteurs Espagnols professionnels au cours de 4 saisons consécutives (2007-2011). Leurs résultats montrent que la période de mars et avril correspond à une période de catabolisme important et à un stress hormonal très présent. En effet, pendant cette période les valeurs du ratio $[T]/[C]$ étaient très basses et celles du $[C]_{sg}$ étaient élevées dès que les joueurs présentaient un temps de jeu supérieur à 25 min par match. Là encore, les auteurs préconisent le suivi de $[T]_{sg}$ et $[C]_{sg}$ pour prévenir le stress excessif causé par les exigences d'une saison professionnelle. Il faut néanmoins rester prudent sur les réponses de ces marqueurs en relation avec l'entraînement. Pour Urhausen et Kindermann (2002), il semble plus pertinent d'utiliser les variations de $[T]_{sg}$ et $[C]_{sg}$ en comparaison avec des valeurs basales de référence. D'autres études se sont focalisées sur les réponses à l'entraînement à partir des concentrations de $[CK]_{sg}$ attestant des dommages musculaires causés par l'exercice physique et significativement corrélés à une baisse de la fonction neuromusculaire lors d'un CMJ ($r = 0.64$; $p < 0.05$) (McLellan et al., 2010). Ces dommages musculaires peuvent avoir comme origine les nombreux contacts lors des sports d'opposition mais également lors des courses à des vitesses élevées (Oxendale et al., 2016). Bauduer et al. (2011), étudient la variation de $[CK]_{sg}$ chez des

rugbymen professionnels français lors d'un suivi longitudinal. Les résultats de leurs travaux montrent une augmentation des valeurs de milieu de saison (Figure 1.44). Ces résultats suggèrent que les adaptations chroniques sont induites par la répétition des matchs et des périodes intensives d'entraînement et régulièrement rapportée au pic annuel des blessures musculaires.

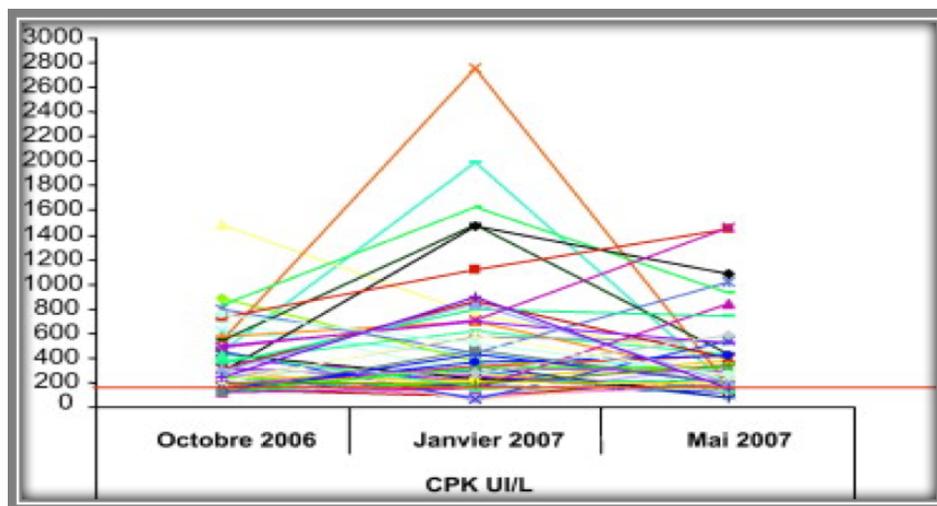


FIGURE 1.44 – Evolution de la concentration sanguine de la créatine protéine kinase (CPK) à 3 moments différents de la saison chez des rugbymen professionnels (Bauduer et al., 2011).

Alaphilippe et al. (2012) montrent une augmentation progressive de $[CK]_{sg}$ au cours de la 1^{re} partie d'une saison chez des jeunes (≈ 20 ans) rugbymen de haut niveau. Cette augmentation débute dès la phase de préparation, d'une durée de 7 semaines, et se poursuit au cours de la 1^{re} partie de la 1^{re} période de compétition (trois premières semaines). Les valeurs tendent à se stabiliser ensuite sur les autres prélèvements de la saison, témoignant de l'adaptation de l'organisme à l'ensemble des phases de contacts de part l'amélioration des processus d'adaptation physiologique. Filaire et al. (2013) étudient également l'évolution de certains de ces marqueurs chez des footballeurs professionnels pendant une saison. Dans cette étude, les auteurs montrent une augmentation de $[CK]_{sg}$, ainsi qu'une diminution de la concentration de glutamine, suite à une période de compétition et d'entraînement intensive. Ces auteurs montrent également que sur la fin de saison, les valeurs sont revenues au niveau initial de début de saison. Les résultats des travaux de Finaud et al. (2006) montrent également que $[CK]_{sg}$ diminue de plus de 50% lors d'une période où les charges d'entraînement et de compétition sont moins importantes, indiquant ainsi le lien important entre CE et $[CK]_{sg}$. Certaines études se sont intéressées à d'autres marqueurs biologiques afin de comprendre les mécanismes physiologiques qui sous-tendent une fatigue chronique. Banfi et al. (2006) ont étudié les variations du taux d'hématocrite (H) et de la [Hg] chez des rugbymen italiens de niveau international tout au long de la saison. A partir de 4 mesures réalisées tout au long de la saison, ces auteurs

montrent, en fin de saison, une diminution de [Hg] et une chute du taux de H ($p < 0.05$). Cette période correspondait à une période de compétition très intense. Ces résultats attestent vraisemblablement de l'impact de la longueur de cette saison sur les organismes des sportifs. Dans cette quête perpétuelle d'identification du marqueur idéal d'un état de fatigue, d'autres marqueurs sont utilisés, comme par exemple ceux de la fonction somatotrope. Cette fonction est sous dépendance de GH, sécrétée par l'hypophyse antérieure et également sous contrôle neuroendocrinien (Devesa et al., 1992). Certains effets liés à cette fonction sont dus à l'action périphérique de GH ou par l'intermédiaire de facteur de croissance comme IGF-1. Les effets propres de GH correspondent à la libération du glucose et d'acides gras dans le sang (Møller et al., 1996) tandis que les effets anabolisants, au niveau osseux et musculaire, sont dus à IGF-1 (Hussain et al., 1996). Tout comme l'axe corticotrope, GH est augmentée lors de conditions stressantes comme l'effort musculaire (Pritzlaff et al., 1999). Comme la sécrétion de GH est pulsatile et aléatoire, rendant obsolète son dosage au repos (Bricout et al., 2006), la mesure de la concentration plasmatique d'IGF-1 semble préférable. De plus, IGF-1 est véhiculé par des protéines de liaisons spécifiques (IGFBPs), dont la principale, l'insulin-like Growth Factor Binding Protein 3 (IGFBP-3), semble donner des informations comparables à celles d'IGF-1 dans l'exploration des déficits en GH (Rosenfeld et Bengtsson, 1994). Chez le sportif, une baisse d'IGF-1 témoignerait d'altérations provoquées par une augmentation de la production des cytokines (molécules qui permettent la communication intercellulaire) anti-inflammatoires, notamment les interleukines 6 (IL-6) lors d'un effort musculaire répété. La diminution de la production hépatique d'IGF-1, étant donné son rôle joué dans l'anabolisme et l'utilisation du glucose par le muscle, pourrait signifier un état de surentrainement, même si les études sont assez contrastées à ce sujet. En effet, certaines études montrent parfois une diminution d'IGF-1 (Nindl et al., 2003), d'autres l'absence d'effets (Kraemer et al., 1995) et d'autres encore une augmentation (Koziris et al., 1999) d'IGF-1. Au regard de cette littérature récente, s'appuyant sur d'autres plus anciennes (Brun et al., 1996), certains auteurs préconisent le dosage d'IGF-1 et d'IGFBP-3 (Da Silva et al., 2011; Elloumi et al., 2005) dans le suivi longitudinal des sportifs. Les travaux de Brun et al. (2000) montrent que la concentration d'IGF-1 est inversement corrélée avec le score au QSFMS. En résumé, l'exploration de l'axe somatotrope au repos ne permet pas forcément de distinguer un sujet entraîné d'un sujet fatigué. En revanche, le dosage d'IGF-1 permet d'aider au diagnostic chez le sportif fatigué. Pour faire le lien avec d'autres marqueurs, de nombreux travaux ont exploré les réponses à l'entraînement à partir des marqueurs de l'inflammation musculaire, en dosant des cytokines comme les interleukines 1 (IL-1) et les IL-6 (Slattery et al., 2012; Steinacker et al., 2004), la protéine chimioattractive monocytaire-1 (MCP-1), le lactate déshydrogénase (LDH), la protéine C-réactive (CR-P), la xanthine oxydase (XO), et l'hyoxanthine (Slattery et al., 2012). Ces marqueurs, tout comme les hormones de

la glande thyroïde comme l'hormone tétra-iodothyronine (T4) ou triiodothyroïne (T3), dépendantes de l'hormone thyroïdienne (TSH), peuvent subir des modifications à l'exercice physique. Il faut en revanche garder à l'esprit que, même si une hypothyroïdie ou hyperthyroïdie peut favoriser la survenue d'un état de surentrainement, il n'existe aucune donnée qui corrobore une variation de ces hormones au cours du surentrainement. D'autres explorations existent autour du métabolisme, comme la mesure de la régulation du glucose, mais elles ne font pas clairement l'objet d'un consensus (Bricout et al., 2006). Il en est de même de l'exploration du métabolisme lipidique au regard du surentrainement même s'il a été assez peu étudié. Les travaux d'Aloulou et al. (2003) ont montré chez des footballeurs professionnels une diminution de l'oxydation des lipides en rapport avec une augmentation du score au QSFMS. Les mêmes résultats ont été observés par Manetta et al. (2002) chez des cyclistes professionnels en fin de saison sportive. Toutefois, l'association entre le profil lipidique et le surentrainement n'est pas avérée dans cette étude. D'autres travaux se sont intéressés au dosage des marqueurs du métabolisme du fer dans le diagnostic du surentrainement. Le fer joue un rôle primordial dans le transport d'O₂ (synthèse de l'hémoglobine), dans la constitution de la myoglobine et dans de nombreuses réactions métaboliques. A ce titre, une carence peut-être dommageable pour la performance du sportif. Il devient alors intéressant de doser le fer de réserve, la ferritine plasmatique ([F]_{sg}), véritable indicateur des stocks en fer, dont la concentration augmente en cas d'inflammation et d'augmentation de CE, par augmentation de l'érythropoïèse, hémorragies digestives et rénales dues à l'exercice physique (Newhouse et Clement, 1988), ou par sudation importante (Nachtigall et al., 1996). CE pourrait donc être responsable d'une baisse de la concentration de [F]_{sg} par modification entre le fer circulant et les réserves au niveau osseux (Candau et al., 1992). Malgré le fait qu'il n'existe pas de corrélation entre la baisse de [F]_{sg} et le score au QSFMS (Khaled et al., 1988), il est toutefois intéressant d'éliminer une carence en fer et une anémie au regard d'un état de fatigue. Certains travaux étudient les relations entre des marqueurs perceptifs et d'autres marqueurs comme l'hématocrite ou les leucocytes (Dias et al., 2011; Elloumi et al., 2008).

A notre connaissance, une seule étude (Marin et al., 2011) s'est intéressée à l'effet d'un match de handball sur des marqueurs biologiques ([CK]_{sg} et LDH). Les résultats de cette étude, réalisée chez des joueurs élités Brésiliens, montrent qu'un match amical provoque une élévation marquée des niveaux de LDH et de [CK]_{sg} suggérant de façon indirecte des dommages musculaires. Ces résultats relatifs à [CK]_{sg} corroborent ceux déjà observés après un match de football (Ascensao et al., 2008). Pour Marin et al. (2011) d'autres travaux doivent être réalisés pour étudier l'évolution du stress oxydatif et des marqueurs de l'inflammation musculaire tout au long d'une saison sportive et à la fois pendant les matchs et les entraînements. Bresciani et al. (2010), au cours d'une étude réalisée sur une équipe Espagnole de handball de niveau national, ont étudié CE à partir de sRPE,

du questionnaires POMS, de dosages de marqueurs biologiques de l'inflammation (CR-P et créatine kinase (CK)) et du stress oxydatif (glutathion oxydé (GSSG) et glutathion réduit (GSH))(Tableau 1.24).

TABLEAU 1.24 – Marqueurs biologiques mesurés chez des joueurs de handball pendant une saison entière (Bresciani et al., 2010).

	T1	T2	T3	T4	T5
Erythrocytes (cells $\times 10^{12} \cdot l^{-1}$)	4.9 \pm 0.3	5.0 \pm 0.3	5.0 \pm 0.3	5.1 \pm 0.3	5.3 \pm 0.2*
Haemoglobin (g $\cdot dl^{-1}$)	15.0 \pm 0.8	15.3 \pm 0.8	15.1 \pm 1.0	15.2 \pm 0.7	15.1 \pm 1.1
Haematocrit (%)	42.5 \pm 1.6	44.7 \pm 2.7	44.3 \pm 2.1	44.1 \pm 2.3	45.8 \pm 1.6*
MCHC (g dl^{-1})	34.62 \pm 0.53	34.34 \pm 0.5	33.9 \pm 0.7	34.6 \pm 0.4	33.9 \pm 0.5*
Total leukocytes (cells $\times 10^9 \cdot l^{-1}$)	6.1 \pm 0.7	6.6 \pm 0.9	6.9 \pm 1.2	7.6 \pm 0.8*	8.2 \pm 1.3*
Neutrophils (%)	56.6 \pm 9.3	54.2 \pm 7.2	50.4 \pm 7.5	62.3 \pm 8.6*	57.9 \pm 7.4
Neutrophils (cells $\times 10^9 \cdot l^{-1}$)	4.6 \pm 0.3	3.9 \pm 0.7	4.0 \pm 0.7	5.5 \pm 2.7*	4.5 \pm 1.5
Lymphocytes (%)	31.6 \pm 8.5	34.4 \pm 6.1	38.8 \pm 6.9	27.8 \pm 6.8	30.9 \pm 6.7
Lymphocytes (cells $\times 10^9 \cdot l^{-1}$)	1.9 \pm 0.5	2.1 \pm 0.4	2.4 \pm 0.5	2.0 \pm 0.3	2.0 \pm 0.9
Monocytes (%)	8.5 \pm 1.6	8.1 \pm 1.3	8.0 \pm 1.0	7.4 \pm 1.9	8.7 \pm 2.2
Monocytes (cells $\times 10^9 \cdot l^{-1}$)	0.6 \pm 0.2	0.5 \pm 0.1	0.6 \pm 0.1	0.5 \pm 0.16	0.7 \pm 0.2
Basophils (%)	0.5 \pm 0.2	0.5 \pm 0.1	0.5 \pm 0.1	0.4 \pm 0.1	0.4 \pm 0.2
Basophils (cells $\times 10^9 \cdot l^{-1}$)	0.0 \pm 0.1	0.0 \pm 0.1	0.0 \pm 0.0	0.0 \pm 0.0	0.1 \pm 0.1
Eosinophils (%)	2.8 \pm 1.3	2.8 \pm 1.8	2.3 \pm 0.9	2.1 \pm 1.4	2.1 \pm 1.2
Eosinophils (cells $\times 10^9 \cdot l^{-1}$)	0.17 \pm 0.05	0.2 \pm 0.1	0.2 \pm 0.05	0.1 \pm 0.05	0.2 \pm 0.1
GSH ($\mu mol \cdot l^{-1}$)	539.7 \pm 163.1	730.5 \pm 159.9	609.2 \pm 163.7	639.6 \pm 168.2	696.5 \pm 193.3
GSSG ($\mu mol \cdot l^{-1}$)	11.7 \pm 1.4	17.3 \pm 5.6	21.6 \pm 5.0*	38.6 \pm 14.9*	19.6 \pm 10.4
GSH/GSSG ratio	49.0 \pm 15.8	48.9 \pm 21.3	28.9 \pm 10.2*	18.8 \pm 9.9*	41.4 \pm 28.7
Myeloperoxidase ($\mu g \cdot l^{-1}$)	4.6 \pm 2.7	3.7 \pm 2.0	3.7 \pm 1.5	2.9 \pm 1.9	5.0 \pm 2.4
C-reactive protein (arbitrary units)	1.0 \pm 0.1	1.2 \pm 0.3	1.7 \pm 0.2*	1.4 \pm 0.2*	0.8 \pm 0.1
Creatine kinase (U $\cdot l^{-1}$)	176.7 \pm 44.5	172.1 \pm 107.1	209.6 \pm 71.9	198.6 \pm 155.3	177.44 \pm 152.4

T1, T2, T3, T4, T5 : tests.

Les résultats de cette étude montrent que le taux d'H augmente significativement en fin de saison (T5) comparativement au début de saison (T1). Concernant CK, les auteurs n'observent pas de changement significatif de ce paramètre pendant la saison. En revanche, CR-P augmente significativement entre T1 et T3, et T1 et T4, ce qui correspond à des phases où la CE est élevée. Les auteurs évoquent la possibilité que ces 2 périodes chargées créent des inflammations musculaires chez les athlètes. Enfin, concernant les marqueurs du stress oxydatif, les auteurs suggèrent que la réponse inflammatoire et la possible propagation des dégâts musculaires occasionnés par la pratique sportive intense, soient responsables de l'augmentation des taux de GSSG et GSH.

Comme on peut le constater, au regard de la littérature, il n'existe pas à ce jour un marqueur qui se suffise à lui même pour attester d'un état de surentraînement. Les études se succèdent pour apporter régulièrement de nouvelles informations dans le monitoring de l'état de forme du sportif mais sans réel consensus. Il demeure complexe de tirer des conclusions sur les effets d'une pratique compétitive prolongée à travers le dosage de paramètres biologiques. On observe néanmoins qu'une saison à haut niveau induit des modifications significatives de certains paramètres biologiques. Les plus affectés restent les marqueurs des dommages musculaires, du stress oxydatif, de l'inflammation ainsi que les marqueurs du système endocrinien. Quoi qu'il en soit, la plupart des études ne montrent

pas une évolution progressive des paramètres tout au long de la saison. Les évolutions les plus significatives sont plutôt observées suite à une période de compétition et/ou d'entraînement intensif. Les adaptations chroniques de l'organisme à une saison de compétition semblent donc dépendre au moins autant de la gestion de CE que de la gestion du stress physiologique propre à chaque match. Concernant le handball, peu d'études se sont intéressées au suivi longitudinal de joueurs de très haut niveau incluant des dosages biologiques. C'est en partie ce que nous avons essayé de faire au cours de notre troisième étude, avec le suivi longitudinal d'un certain nombre de paramètres biologiques : $[CK]_{sg}$, $[C]_{sg}$, $[T]_{sg}$, IGF-1, IGFBP-3, $[F]_{sg}$ et H.

1.6.4 La variabilité de fréquence cardiaque

1.6.4.1 Le système nerveux autonome : bases physiologiques

Le rythme cardiaque, qui augmente à l'inspiration et diminue à l'expiration, n'évolue pas de manière constante au cours du temps. Il existe une fluctuation dans les intervalles de temps séparant deux battements cardiaques. Cette fluctuation est nommée variabilité de fréquence cardiaque (VFC) (Task Force, 1996). Chez l'être humain, le système nerveux (SN) est constitué du système nerveux périphérique (SNP) et du système nerveux autonome (SNA). Le SNP guide notre appareil locomoteur par son action sur les muscles squelettiques, effecteurs du mouvement. Le système nerveux autonome assure le maintien de l'homéostasie et fonctionne indépendamment de la conscience. Ce système est sous le contrôle de centres situés dans plusieurs structures cérébrales telles que l'hypothalamus, le bulbe rachidien et les insulae des deux hémisphères qui reçoivent des informations du système limbique et de diverses régions du cerveau. La plupart des organes du corps reçoivent une double innervation venant du SNA : une branche sympathique "excitatrice" et une branche parasympathique "inhibitrice". Le système parasympathique s'occupe d'ajuster la vie interne de l'organisme alors que le système sympathique est activateur et prépare l'organisme à l'action. Ces deux composantes sont antagonistes et fonctionnent simultanément, par l'intermédiaire de neurotransmetteurs différents, permettant d'effectuer des actions différentes sur chacun des organes (Figure 1.45).

Le système sympathique est en relation avec les systèmes de production d'énergie et son action est généralement catabolisante. Corssmit et al. (2001); Gozal et al. (1997); Niiijima (1983) ont montré que le système sympathique (i) participait à la libération du glucose dans le sang par la voie hépatique en stimulant la libération du glucagon et en inhibant la libération d'insuline par le pancréas et (ii) activait la production d'ATP par la voie glycolytique au niveau musculaire. Richter et al. (1982) ont montré qu'une augmentation de l'activité sympathique stimulait la production de lactate musculaire. La glande médullosurrénale fait partie du système sympathique et constitue l'équivalent d'un gan-

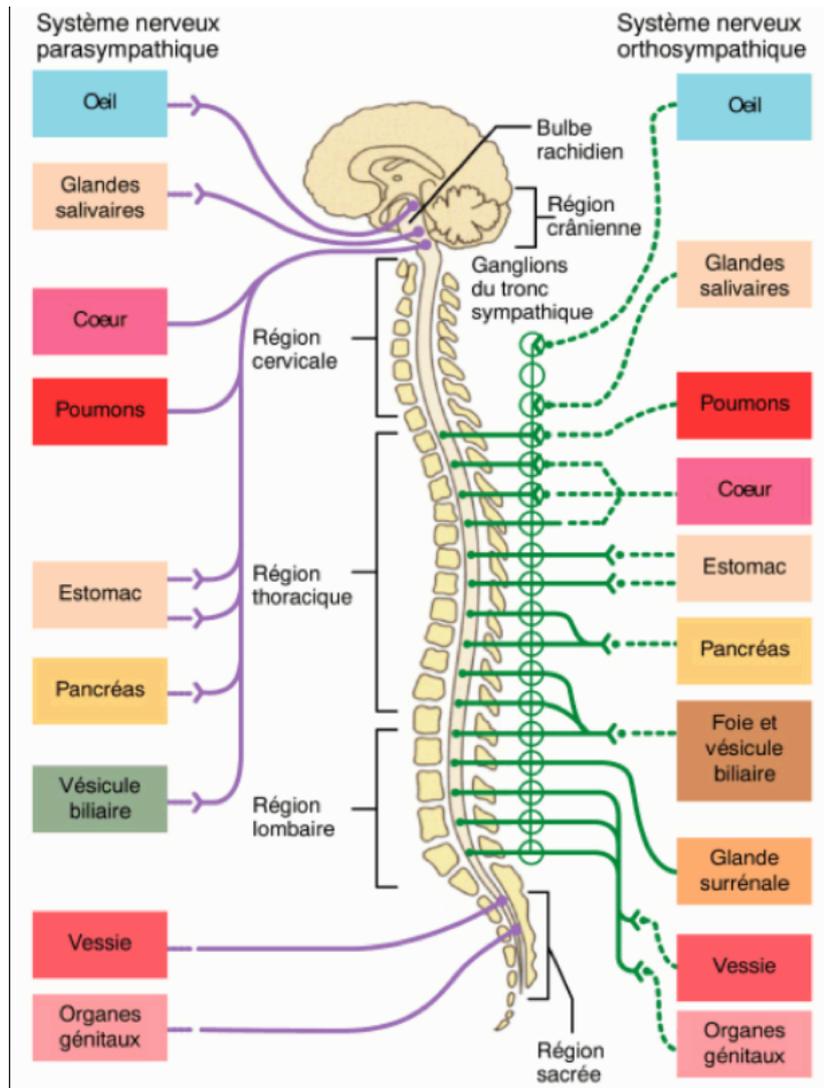


FIGURE 1.45 – Représentation du système nerveux orthosympathique et parasympathique.

gion sympathique à fonction endocrine. La médullosurrénale libère dans le sang, sous la stimulation de fibres pré-ganglionnaires descendant directement du système nerveux central, des hormones qui sont, pour 20% environ de sa production, de la noradrénaline (NA) et pour 80% environ, de l'adrénaline (AD). Ces hormones catécholamines ont la propriété d'augmenter la fréquence de dépolarisation du nœud sinusal. C'est ce qu'on appelle l'effet chronotrope positif qui agit sur FC en induisant une tachycardie. Ces hormones induisent également un effet inotrope positif qui agit sur la contractilité cardiaque. Enfin, elles induisent un effet domotrope qui joue sur la conduction vers le nœud auriculoventriculaire. Le cœur est alors capable de pomper plus de sang et donc d'en envoyer plus dans l'organisme à chaque systole ventriculaire. Les hormones catécholamines ont également des effets sur le degré de dilatation ou de constriction des vaisseaux sanguins. Pour cet effet sur les vaisseaux, on distingue 2 catégories de fibres sympathiques. La 1^{re} catégorie de fibres est dite adrénergique. L'adrénaline qu'elles libèrent a un effet vasoconstricteur. Ces fibres sont très présentes dans l'ensemble de l'organisme, notamment au niveau de la peau et des viscères. La 2^e catégorie de fibres est dite cholinergique car elles libèrent de l'acétylcholine dont l'effet est vasodilatateur. Elles sont très présentes au niveau des muscles striés squelettiques et du cœur lui-même.

Le système parasympathique est, quant à lui, fortement impliqué dans le contrôle et la régulation de l'homéostasie et dans la resynthèse des réserves de glucose et de glycogène musculaire et hépatique en stimulant la libération d'insuline par le pancréas et en inhibant la libération du glucagon comme l'ont montré Shimizu (1971) et Stumpel (1997). La stimulation des fibres parasympathiques, qui prennent naissance dans le tronc cérébral et la moelle sacrée, sécrète de l'acétylcholine. Ses effets au niveau cardiaque sont une diminution de la fréquence de dépolarisation du nœud sinusal, correspondant à un effet inotrope négatif entraînant une bradycardie (Figure 1.46).

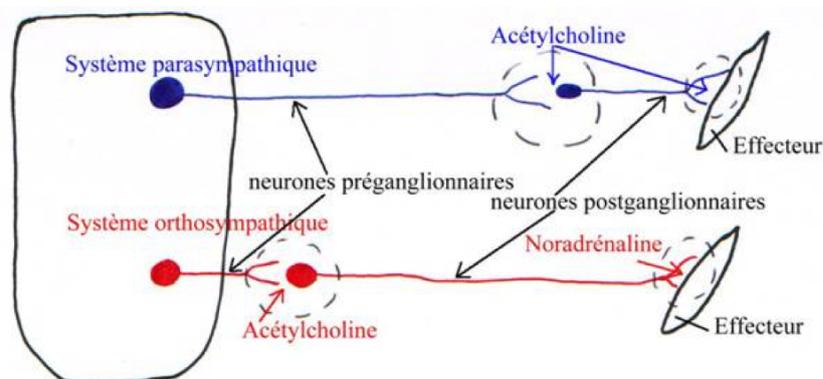


FIGURE 1.46 – Organisation des voies efférentes du système nerveux autonome (www. biologiesv.com).

Le cœur est capable de fonctionner de manière automatique et n'a recours à aucune innervation pour se contracter. Cet automatisme est dû aux cellules pacemaker du nœud

sinusal qui ont une dépolarisation spontanée pendant la diastole. Le coeur se contracte alors à un rythme régulier de 100 battements par minute (BPM). Cependant, il est largement sous contrôle de la double innervation sympathique et parasympathique (Jalife et Mickaels, 1994) et l'activité électrique intrinsèque est soumise à des influences extrinsèques par le biais des nerfs arrivant au niveau du myocarde (Figure 1.47). Les nerfs sympathiques se terminent sur le coeur (noeud sinusal, oreillettes et ventricules) principalement via les récepteurs β -adrénergiques. Les fibres parasympathiques du nerf pneumogastrique ou vague, innervent principalement l'atrium et le système nodal (Dhein et al., 2001). C'est par le biais de cette action hormonale que le SNA permet de faire varier FC, en deçà ou au-delà de la fréquence de dépolarisation intrinsèque du tissu nodal en fonction des besoins, notamment lors de l'exercice physique.

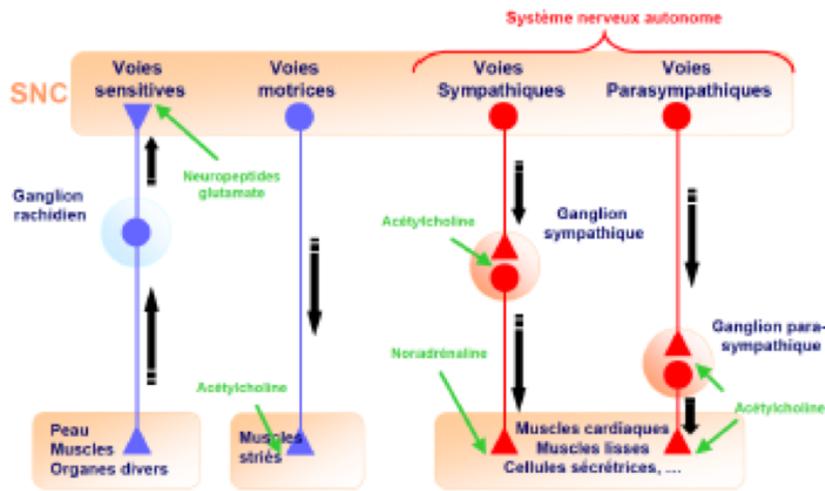


FIGURE 1.47 – Voies d'accès sympathique et parasympathique.

1.6.4.2 Outils de mesure

Akselrod et al. (1981) ont montré que l'activité chronotrope cardiaque résulte de la réponse du noeud sinusal aux influences sympathique et parasympathique et qu'il est possible à partir de l'analyse de la régulation de cette activité cardiaque d'avoir des indicateurs indirects du niveau d'activité des systèmes sympathique et parasympathique. L'activité de ces deux systèmes pourrait être évaluée de manière invasive par prélèvements de plusieurs marqueurs biologiques comme les catécholamines. Cependant, limités par des problèmes de variabilité inter-individuelle et de coût, ces marqueurs biologiques sont peu exploités dans le domaine du sport. L'observation battement par battement de FC ou des intervalles (en millisecondes) entre les battements cardiaques (intervalle R-R), a montré qu'il existait une variabilité importante entre les écarts de ces battements. Le terme de variabilité de FC pour décrire les variations instantanées de FC et des intervalles R-R a été retenu (Task Force, 1996). La détection des battements nécessite l'analyse du signal ECG

et plus particulièrement l'identification de l'onde R, la plus marquée du complexe dépolarisation ventriculaire (QRS). Le signal ECG (Figure 1.48) commence par la dépolarisation des oreillettes qui entraîne leur contraction (P). Ensuite, la contraction des ventricules est marquée par la QRS. Enfin, l'intervalle ST correspond à la période d'excitation des ventricules et l'onde T désigne la fin de la repolarisation ventriculaire (Figure 1.48).

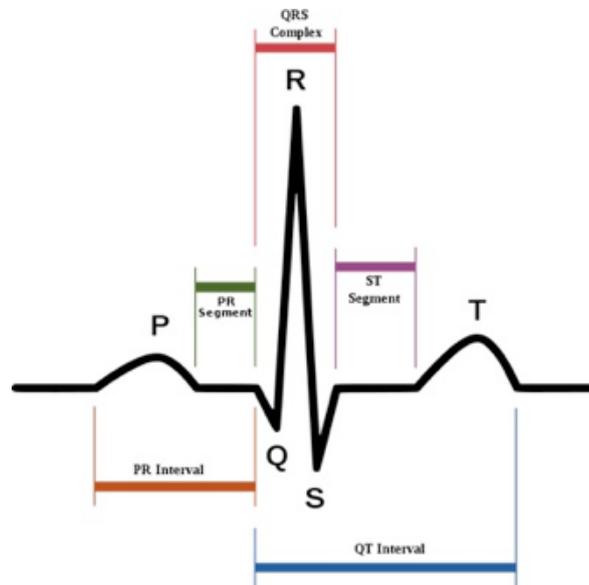


FIGURE 1.48 – ECG et chaque onde P, Q, R, S et T signalée.
Agateller Wikipédia,DP.

Entre 2 battements consécutifs, FC est sous l'influence de 2 synchroniseurs physiologiques que sont la fréquence respiratoire (FR) et la tension artérielle (TA). Ces 2 synchroniseurs imposent des adaptations, à plus ou moins court terme, qui reflètent une combinaison des influences parasympathique à court terme, liées à l'acétylcholine ou sympathique à plus long terme, liées à la NA. L'existence de ces variations instantanées du rythme cardiaque résulte d'une activité oscillante du SNA par ses branches sympathiques et parasympathiques. On obtient ainsi les durées successives des intervalles R-R qui sont inversement proportionnelles aux FC instantanées (Figure 1.49).

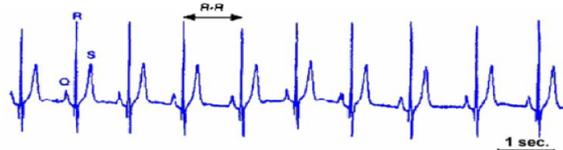


FIGURE 1.49 – Détection des battements cardiaques et mesure de l'intervalle R-R entre deux battements consécutifs.

Analyse de la VFC par la méthode temporelle

L'enregistrement d'une série d'intervalles R-R permet d'estimer la variabilité du signal par la mesure de l'intervalle R-R moyen (différence entre l'intervalle R-R le plus long et le plus court). L'écart type de la série complète d'intervalles R-R (SDNN) est égale à la puissance totale de l'analyse spectrale. Cet indice reflète l'ensemble des composantes cycliques responsables de la variabilité pendant toute la période d'enregistrement. La différence au carré des intervalles R-R (RMSSD) représente la variabilité à court terme, considérée comme plus proche de la modulation parasympathique que d'une modulation sympathique. Enfin, d'autres valeurs peuvent être exploitées, comme le nombre d'intervalle R-R successifs de plus de 50ms (NN50) et le NN50 divisé par le nombre total d'intervalles R-R successifs (pNN50) (Kamen et Caldwell, 1996; Kleiger et al., 1992; Task Force, 1996). Cependant, la variabilité dans le domaine temporel ne permet pas de différencier les facteurs physiologiques à l'origine de cette variabilité complexe. Une même variance peut correspondre à des profils différents de modulation neurovégétative. Il faut pour cela décrire les fluctuations de FC en terme de quantité d'oscillations selon des fréquences spécifiques à partir d'une analyse spectrale.

Analyse de la VFC par la méthode fréquentielle

Les méthodes fréquentielles permettent d'obtenir une analyse spectrale de l'activité de VFC. Cette analyse spectrale est une analyse mathématique réalisée par Transformée de Fourier (Akselrod et al., 1985) ou par méthode autorégressive (Pagani et al., 1986) permettant, à partir des oscillations du rythme cardiaque, d'obtenir un spectre de distribution des fréquences (Persson, 1996; Task Force, 1996). La variation totale des séries est composée d'un mélange de sigmoïdes et est décomposée en composantes fréquentielles caractérisées par leur puissance spectrale et leur fréquence. La puissance spectrale, dans une bande de fréquence donnée, est représentée par l'aire sous la courbe. Akselrod et al. (1981) et Pomeranz et al. (1985), par des analyses spectrales dans différentes postures (couchée ou debout) et sous différentes conditions pharmacologiques, ont mis en évidence la relation entre différentes composantes du spectre d'énergie et, d'une part, les oscillateurs physiologiques responsables de cette variabilité du rythme cardiaque, et d'autre part, les influences sympathiques et parasympathiques du système nerveux autonome sur ses oscillateurs. Ils ont rapporté une relation entre la fréquence des écarts entre les ondes R-R et, d'une part, les oscillations de la pression artérielle et de la fréquence respiratoire et, d'autre part, les influences sympathiques et parasympathiques :

- Une bande de très basses fréquences (VLF), inférieure à 0.04Hz, représenterait l'activité à long terme de la thermorégulation et du système rénine-angiotensine. Les implications physiologiques de cette bande de fréquence n'étant pas encore clairement établies à ce jour (Task Force, 1996) (Figure 1.50).

- Une bande de basses fréquences (LF) comprise entre 0.04 Hz et 0.15Hz, déterminée par les oscillations de la pression artérielle. Elle constitue un reflet de l'activité sympathique puisqu'on observe une diminution partielle de la bande de fréquence LF sous blocage \emptyset -adrénergique par le propranolol mais aussi de l'activité parasympathique puisque cette composante fréquentielle est diminuée sous atropine (Akselrod et al., 1981; Pomeranz et al., 1985). Cependant pour Pagani et al. (1986), cette bande de fréquence ne reflète que l'activité sympathique et non pas une influence mixte sympathique et parasympathique. Néanmoins, pour certains auteurs (Houle et Billman, 1999; Persson et al., 1992; Pomeranz et al., 1985) les LF représenteraient l'activité sympathique et parasympathique.
- Une bande de hautes fréquences (HF) supérieure à 0.15Hz, déterminée par le rythme ventilatoire. Elle est le reflet de l'activité parasympathique (Persson, 1996; Persson et al., 1992; Pomeranz et al., 1985), car elle disparaît sous l'effet de l'atropine qui est un inhibiteur de l'acétylcholine (Pomeranz et al., 1985). L'acétylcholine a une durée de vie très courte (inférieure à une seconde) et la réponse parasympathique est plus rapide que l'action des réflexes cardiaques sympathiques par l'activation des barorécepteurs (Coleman, 1980).

Ces méthodes sont robustes, reproductibles et peuvent être utilisées pour des mesures répétées. Leur validité est plus forte dans l'analyse de mesures effectuées sur des périodes relativement courtes de quelques minutes que pour des enregistrements plus longs de plusieurs heures (Kowalewski et Urban, 2004). Lors des enregistrements de FC, afin de pouvoir analyser la relation entre la bande spectrale et un état physiologique particulier, il est nécessaire que le signal soit stationnaire, c'est-à-dire que la situation et la modulation végétative soient stables pendant l'enregistrement, ce qui est plus difficile à obtenir lors d'enregistrements de longue durée que pour des enregistrements de quelques minutes. La fréquence d'échantillonnage ne doit pas être inférieure à 250 – 500Hz, et il est préférable de choisir une fréquence d'échantillonnage de 1000Hz (Yamamoto et al., 1991). Les artefacts du signal électrocardiographique (bruits parasites, troubles du rythme) peuvent modifier significativement la bande de puissance spectrale. Il est donc très important de corriger ces artefacts au moyen d'une méthode valide qui respecte la variabilité du signal ECG, ce qui conduit à exclure l'utilisation de filtres. Lors d'un enregistrement, la fréquence respiratoire du sujet ne doit pas être inférieure à 10 cycles par minute, ce qui correspond à 0.15Hz. Dans le cas contraire, la composante fréquentielle, déterminée par le rythme ventilatoire, se déplace dans la bande de LF (Figure 1.51). Sinon, il n'est plus possible de différencier la composante ventilatoire " parasympathique " de la composante pression artérielle à connotation " sympathique " (Akselrod et al., 1981).

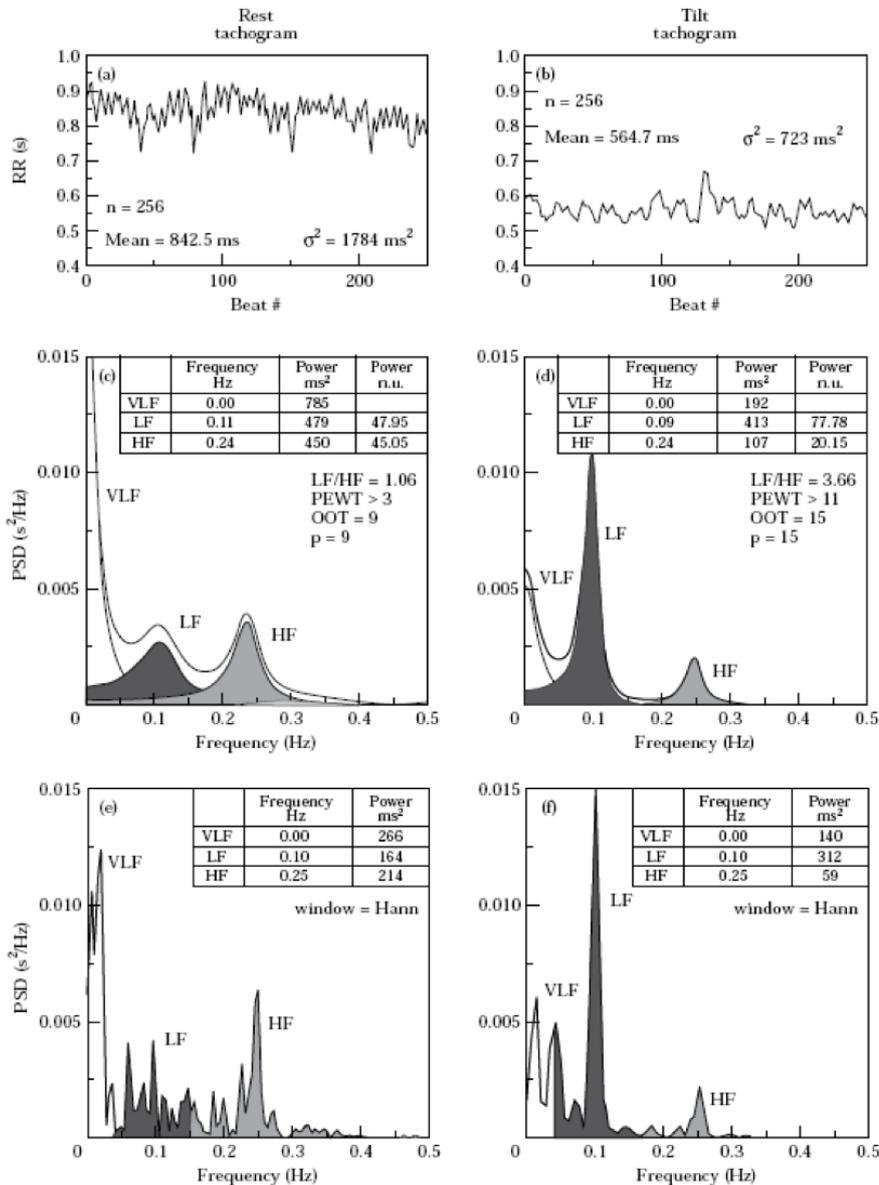


FIGURE 1.50 – Task Force (1996) : exemple d'un enregistrement de 252 intervalles R-R consécutifs chez un sujet normal en position couchée de repos et suite à un Tilt test après le passage en position debout.

L'énergie spectrale est calculée à partir des méthodes paramétriques autorégressive (c et d) et non paramétriques de fft (e et f).

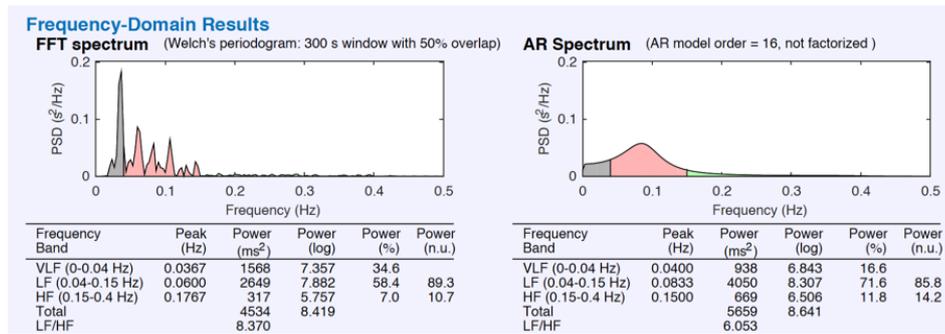


FIGURE 1.51 – Analyse spectrale des intervalles R-R par FFT et AR.

D'autres méthodes d'analyse spectrale (ondelettes, mesure de l'entropie, Detrended Fluctuation Analysis...) permettent également d'étudier des signaux non-stationnaires comme cela peut être le cas à l'exercice et rendent compte de la complexité et des signaux (Figure 1.52).

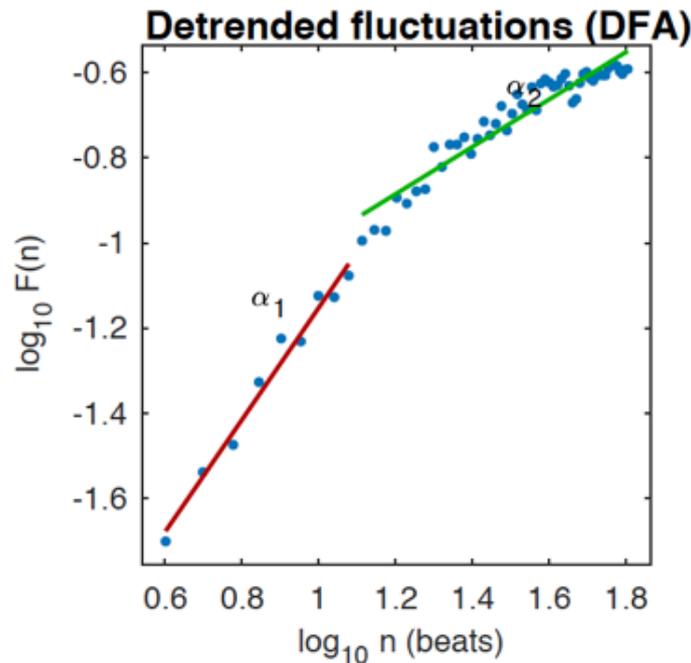


FIGURE 1.52 – Représentation de la méthode DFA permettant de mesurer l'autocorrélation d'une série et donc sa prédictibilité (extrait du logiciel Kubios).

On illustre également la VFC par la représentation graphique Poincaré (figure 1.53). Elle consiste à tracer chaque intervalle R-R en fonction du précédent qui conduit ainsi à un nuage de point caractérisant la VFC sur la période étudiée.

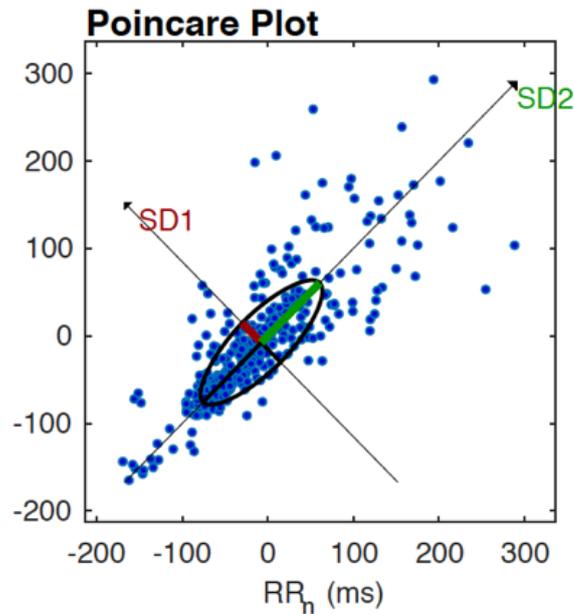


FIGURE 1.53 – Représentation graphique du "Poincaré plot" des intervalles R-R sur un enregistrement cardiaque de 5 minutes.

SD1 : indice de variabilité à court terme représentant la part parasympathique; SD2 : indice de variabilité globale représentant la part sympathique et parasympathique; RR_n : intervalles successifs de R.

Mise en place du test de VFC

Constitué par un tachogramme² (Kleiger et al., 1992), l'analyse de la VFC exige un rythme sinusal stable et une bonne qualité du signal ECG afin d'assurer une bonne précision dans la détection des ondes R, permettant l'obtention d'une série R-R de bonne qualité. De plus, comme la transformée de Fourier demande également un système fréquentiel le plus stable possible, l'analyse devra se faire dans des conditions de stabilité optimales et standardisées (le matin au lever, au repos, vessie vide). Le protocole du test (tilt test actif) consiste en un enregistrement de FC (des intervalles R-R) pendant une période de 7 min dans la position couchée, suivi d'un passage en position debout, sans bouger, d'une durée de 6 min (Figure 1.54) (Schmitt et al., 2013). L'interprétation des données exigera une certaine prudence en raison de la complexité des interactions (Pumpřla et al., 2002).

Le test VFC est réalisé à partir d'un électrocardiogramme ou plus facilement réalisable à partir d'un cardiofréquencemètre permettant l'enregistrement des intervalles R-R (ex : Polar RS800; Suunto T6; Polar Team System 2). Les données sont ensuite analysées avec un logiciel spécifique tel que Kubios® (Figure 1.55), Nevrokard® ou d'autres plus

2. Tracé de l'évolution du rythme cardiaque.

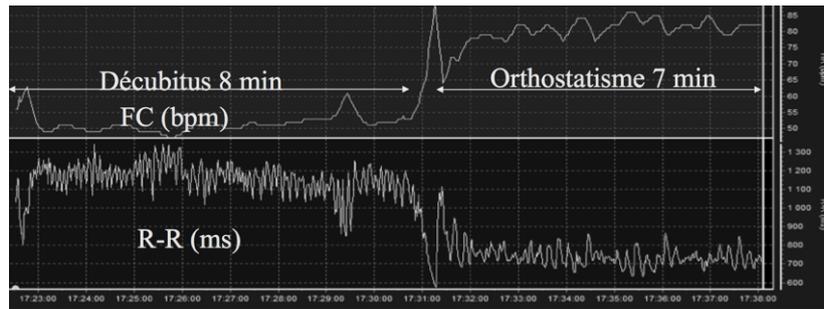


FIGURE 1.54 – Analyse des intervalles R-R dans 2 positions sur un enregistrement de 15 minutes.

récemment arrivés sur le marché. L'interprétation des données exigera une certaine prudence en raison de la complexité des interactions (Pumprla et al., 2002) et de la sensibilité de certains facteurs physiologiques (la respiration, l'hydratation, le rythme circadien) et environnementaux (altitude, température extérieure et ambiance sonore) (Achten et Jeukendrup, 2003). Au final, la standardisation rigoureuse de la mesure, le matériel adapté, ainsi que la répétition des mesures, seront autant de gages de réussite des mesures réalisées.

1.6.4.3 Etat de l'art

D'abord utilisée comme un facteur prédictif de l'insuffisance cardiaque, de maladies coronariennes et de mort subite (Bigger et al., 1993; Lombardi et al., 2001; Tsuji et al., 1996), VFC est depuis les années 1990, de plus en plus validée en lien avec l'entraînement (Aubert et al., 2003; Berntson et al., 1997; Bosquet et al., 2008; Buchheit et al., 2010, 2008, 2011; Hedelin et al., 2000; Pichot et al., 2002; Uusitalo et al., 2000). En effet, il est aujourd'hui bien établi dans la littérature qu'un entraînement répété durant plusieurs semaines amène des fluctuations de VFC en relation avec CE (Pichot et al., 2002). Dans des conditions de fatigue, on constate une baisse de l'énergie totale, aussi bien sur les ondes de basses fréquences (sympathique) que dans les bandes de haute fréquence (Schmitt et al., 2013). Les récents travaux de Schmitt et al. (2016) vont encore plus loin et permettent de caractériser différentes typologies de fatigue, afin d'orienter de manière individuelle, les contenus d'entraînement et les modalités de récupération. Dans leur étude, menée sur des skieurs nordiques de niveau olympique, les auteurs déterminent quatre caractéristiques de fatigue : (i) L'hypertonie orthosympathique en position couchée (Figure 1.56, schéma 2), (ii) l'hypotonie orthosympathique et parasympathique en position couchée (Figure 1.56, schéma 1), (iii) l'hypertonie parasympathique en position couchée (Figure 1.56, schéma 4) et enfin (iv) l'hypotonie orthosympathique en position debout (Figure 1.56, schéma 3). Toujours en 2015, Schmitt et al. (2016) ont effectué un suivi de deux ans sur un nageur de niveau olympique pour mieux comprendre l'évolution de l'état de forme de l'athlète. Ils montrent qu'un nageur élite développe trois caractéristiques de fa-

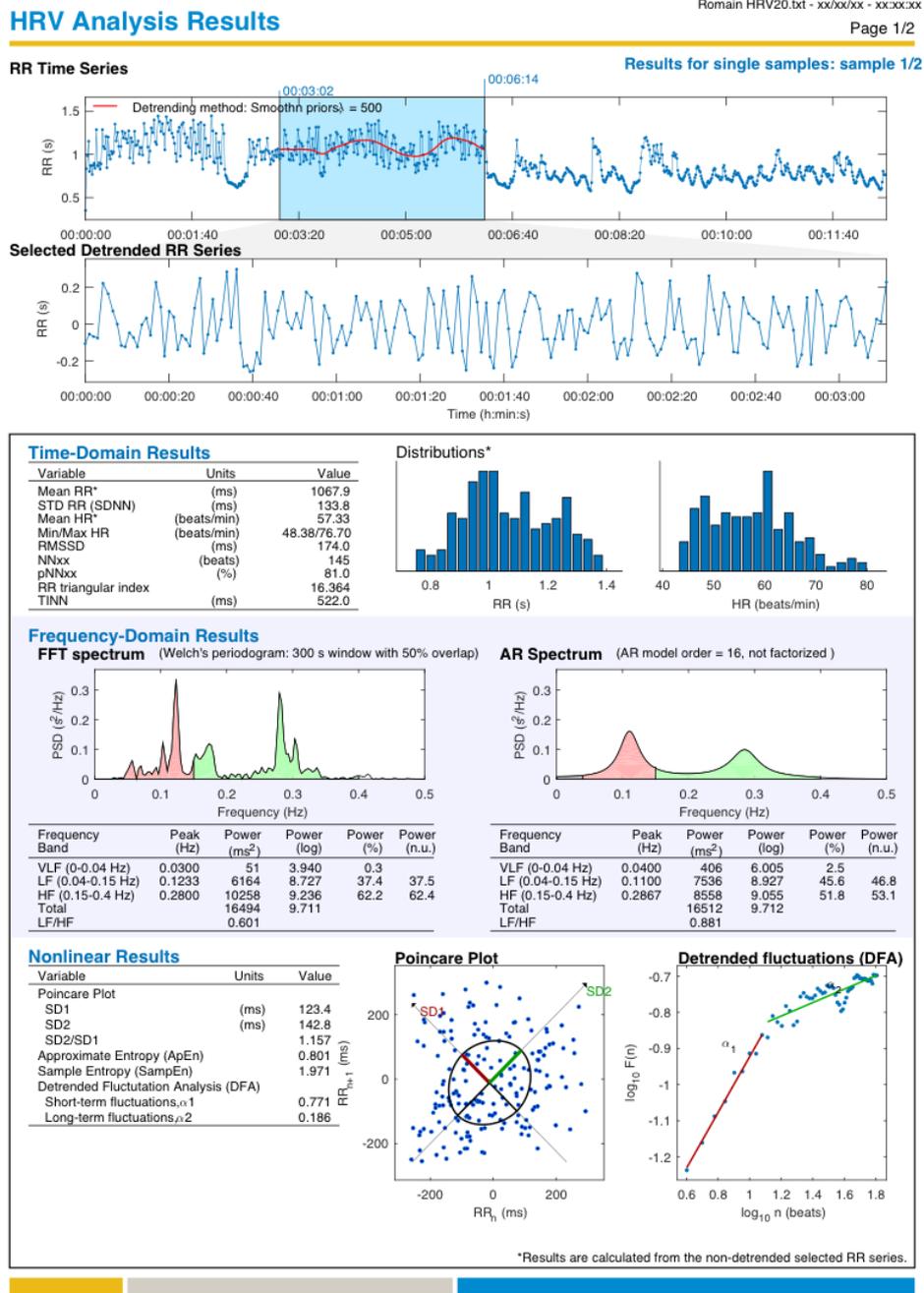


FIGURE 1.55 – Exemple de rapport d'enregistrement et d'analyse de VFC à partir du logiciel Kubios®(Finlande).

tigues à partir des mesures de VFC. Chaque type correspond à des changements spécifiques d'ordre sympatho-vagal. Cette étude, avec celle effectuées sur les skieurs nordiques (Schmitt et al., 2015a), est à notre connaissance la seule qui utilise cette technique pour monitorer les différents types de fatigue. Les auteurs concluent que d'autres études sont nécessaires afin de mieux comprendre la prévalence de ces états de fatigue dans les autres sports.

Comme on peut le voir, VFC est régulièrement utilisée dans des sports individuels d'endurance (Schmitt et al., 2015b), chez des nageurs élités (Pichot et al., 2000; Schmitt et al., 2015b), chez des coureurs de demi-fonds (Plews et al., 2013) et chez des triathlètes (Le Meur et al., 2013). Ce type d'investigation s'introduit progressivement dans le domaine des sports collectifs comme le football (Boullosa et al., 2012), le rugby (Edmonds et al., 2013; Nakamura et al., 2016) et le handball (Buchheit et al., 2015). Les travaux de Bricout et al. (2010) montrent, chez de jeunes joueurs de football, que la session d'entraînement de la veille influence la réponse du SNA (via les indicateurs de FC, intervalle R-R et pNN50) du lendemain matin.

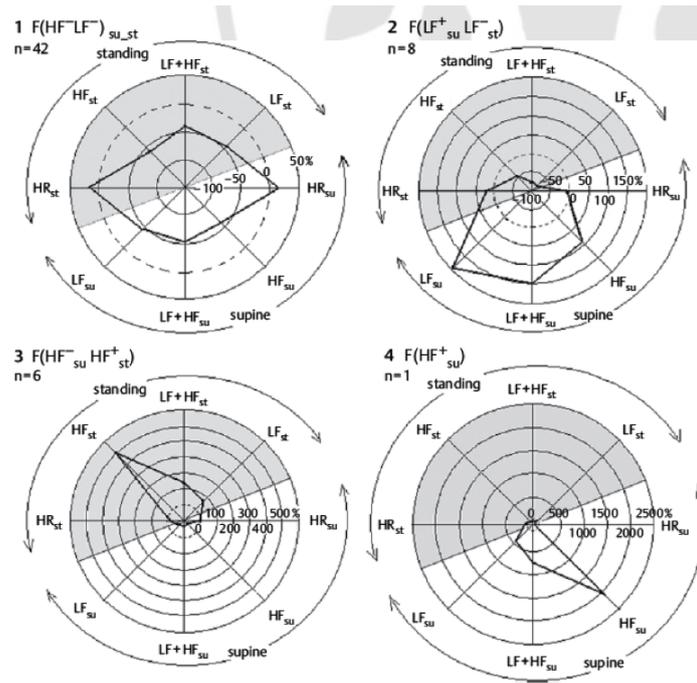


FIGURE 1.56 – Typologie de fatigue déterminée à partir de la VFC (Schmitt et al., 2015a).

Radars exprimés en différences relatives (%) entre les valeurs médianes de "non fatigue" pour le même groupe. HR : fréquence cardiaque; LF : basse fréquence; HF : haute fréquence; HFsu : haute fréquence en position couché; LFs_u : basse fréquence en position couché; HFst : haute fréquence en position debout; LFst : basse fréquence en position debout.

Au regard de la littérature on s'aperçoit que les décisions prises en fonction des résultats au test VFC sont toujours difficiles à prendre au regard de l'approche multifactorielle de la performance. Cela peut avoir des conséquences (i) positives, si les remédia-

tions données à l'athlète lui permettent de retrouver un niveau de performance ou (ii) négatives, si les préconisations ne sont pas adaptées ou que le test est trop proche de la compétition, ne permettant pas le réajustement nécessaire (Buchheit et Laursen, 2014). Pour ces raisons, Buchheit et Laursen (2014) préconisent une utilité limitée de la mesure de VFC dans les sports collectifs quand les matchs sont trop rapprochés (Buchheit et Laursen, 2014).

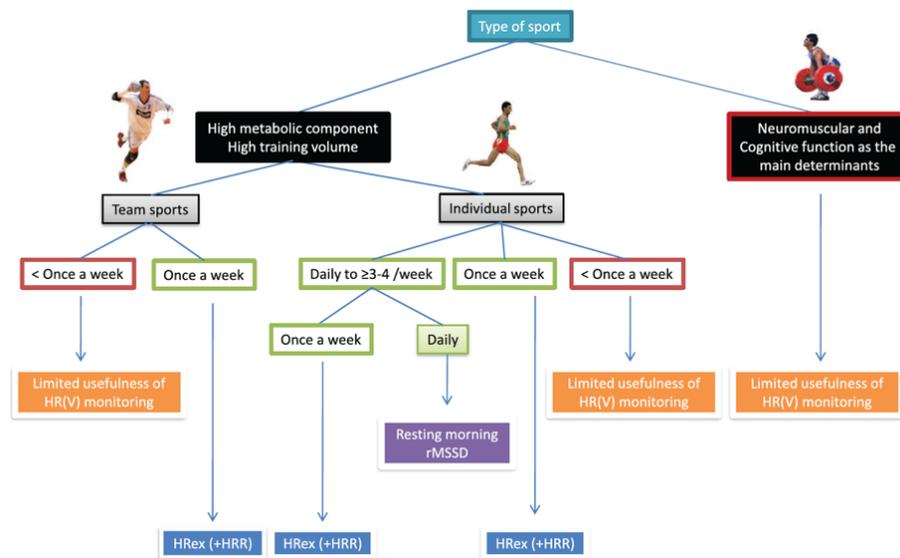


FIGURE 1.57 – Indications d’outils intéressants afin de monitorer les variations d’état de forme selon le type de sport (Buchheit, 2014).

De plus, dans les sports collectifs au plus haut niveau de pratique, il est toujours délicat de sortir un joueur du dispositif global, en le mettant au repos ou en diminuant CE. Un "collectif" est souvent dépendant des individus qui le composent et la sortie d'un joueur peut déstabiliser l'ossature et l'efficacité du collectif. Pour éviter ces dérives, il est important de multiplier les mesures, afin de détecter le plus tôt possible une dérive des valeurs et permettre d'avoir suffisamment de temps pour rectifier le contenu d'entraînement.

Au final, la mesure de VFC peut-être définie comme une technique non invasive, peu coûteuse et relativement facile à utiliser en routine afin d'aider les staffs à quantifier CE dans les sports collectifs, même si elle ne doit rester qu'un outil au service du suivi de l'athlète, inclus dans une approche systémique. Il reste néanmoins important de multiplier les outils de détection d'un état anormal d'entraînement (de sur-charge ou de sous charge) afin d'offrir la solution la plus complète possible dans le monitoring des réponses à l'entraînement (McLean et al., 2010). La grande difficulté sera alors de bien choisir ces outils afin d'être efficace dans le suivi de l'état de forme des athlètes, comme par exemple en associant VFC avec d'autres mesures régulières comme le suivi des performances au CMJ (Cormack et al., 2008), couplé avec des questionnaires de sensation d'état de forme (Hooper et al., 1995). Cependant, l'analyse des variations de ces marqueurs ne permet pas

tout le temps de prendre la bonne décision.

Par conséquent, l'analyse de VFC apparaît comme une méthode prometteuse permettant de déterminer le niveau de fatigue quotidien (Meeusen et al., 2013). L'analyse de cette fatigue permettrait de décrire sa régulation dans une population de sportifs de haut niveau afin d'appréhender les modifications de régulation, pouvant précéder la survenue d'un éventuel état de fatigue ou de blessures (Schmitt et al., 2015a). **Pour toutes ces raisons, nous avons utilisé VFC dans le cadre de nos travaux de thèse afin d'effectuer un suivi longitudinal de l'état de forme des joueurs professionnels du club.**

2

Contribution personnelle



*« La compétition sportive est une
parabole qui illustre parfaitement
la grande course de la vie »*

Claude Lelouch

2.1 Buts et orientation des études

Depuis que, dans de nombreux pays, le handball est considéré comme un sport professionnel (2003), il est de plus en plus médiatisé et les études scientifiques sur ce sport se sont multipliées (Buchheit, 2009; Cardinale et al., 2016; Chelly et al., 2011; Karcher et Buchheit, 2014; Kruger et al., 2013; Luig et al., 2008; Michalsik et al., 2014, 2015b; Pers et al., 2002; Povoas et al., 2014, 2012; Sibila et al., 2004; Ziv et Lidor, 2009). Cependant, comme le préconisent Ziv et Lidor (2009) dans leur revue de littérature, il est nécessaire de continuer à mener des études sur le handball. En effet, peu de travaux scientifiques se sont par exemple intéressés au suivi longitudinal d'un groupe de handballeurs professionnel de niveau international à l'échelle d'une saison (Bresciani et al., 2010; Gorostiaga et al., 2006). Pourtant la saison sportive d'une équipe professionnelle de handball est longue et contraignante. Les entraînements et les matchs de handball induisent une fatigue aigue (Thorlund et al., 2008), qui va se répéter tout au long de la saison sportive, laquelle est structurée en deux périodes distinctes : une période de préparation précompétitive visant au développement des composantes physiques et technico-tactiques de la performance et une période de compétition.

A partir d'un seul protocole expérimental conduit sur une saison de handball complète (Figure 2.1), deux étapes ont donc structuré nos travaux de thèses. Au cours d'une première étape, nous avons, à l'aide d'un dynamomètre isocinétique, étudié l'évolution du profil musculaire de handballeurs au cours de deux périodes distinctes : une période de préparation précompétitive (Etude 1) et une période de compétition (Etude 2). Au cours d'une seconde étape, concomitante de la première, nous avons monitoré un certain nombre de paramètres (physique, biologique et psychologique) tout au long d'une saison de compétition (Etude 3). La population étudiée dans le cadre de nos travaux était celle des joueurs professionnels du Montpellier Agglomération Handball (MAHB), club de handball au palmarès le plus prestigieux des clubs de handball français, avec 14 titres de Champions de France, 13 victoires en Coupes de France, 10 victoires en Coupes de la Ligue, 2 Trophées des Champions et enfin 1 Ligue des Champions (2003). Au moment de l'étude, la plupart des joueurs de cette équipe étaient des internationaux français ou étrangers.

Plan du protocole expérimental

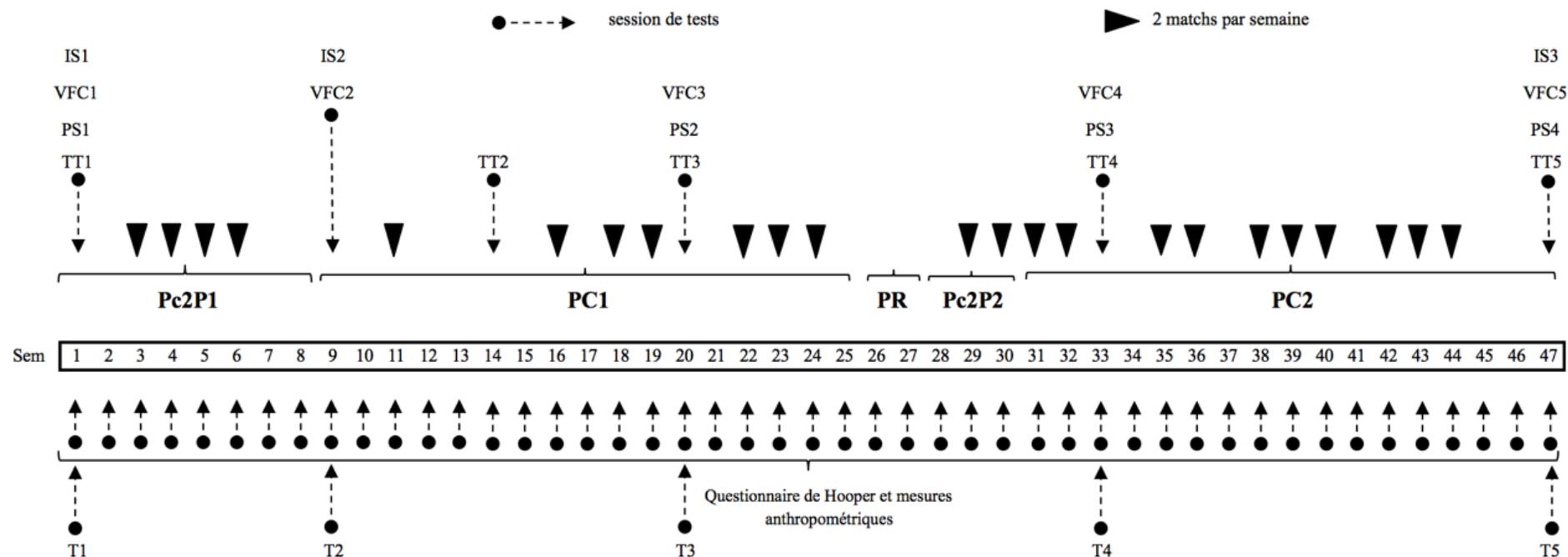


FIGURE 2.1 – Vue d’ensemble du protocole expérimental réalisé au cours de la saison 2013-2014.

Pc2P1 : Préparation pré-compétitive 1; Pc2P2 : Préparation pré-compétitive 2; PC1 : Période compétitive 1; PC2 : Période compétitive 2; PR : Période de repos; TT1-TT5 : tests de terrain (SJ-CMJ-20m navette-5m DA); PS1-PS4 : Prélèvements sanguins; VFC1-VFC5 : Tests de variabilité de fréquence cardiaque; IS1-IS3 : Tests isocinétiques.

2.2 Introduction générale des études 1 et 2

Le handball est joué par 2 équipes de 7 joueurs sur un terrain de 40 x 20 m pendant 2 périodes de 30 minutes. Le temps de jeu réel moyen est de 52.36 ± 5.92 min pour une équipe masculine élite (Michalsik et al., 2015a) avec des joueurs se déplaçant pendant plus de 60% du temps de jeu total sur une distance moyenne de $4\,370 \pm 702$ m (Povoas et al., 2014). Leur activité consiste en une succession d'actions, telles que des sauts, des sprints, des duels offensifs et défensifs, des tirs et des changements de direction, qui sont suivis de récupérations aléatoires (Karcher et Buchheit, 2014; Michalsik et al., 2013; Povoas et al., 2012). Ces actions exercent une forte sollicitation neuromusculaire, principalement sur les membres inférieurs, et se répètent tout au long du match. Elles sont donc essentielles à la performance (Karcher et Buchheit, 2014).

Les actions comme les duels exigent la production d'une force maximale, tandis que d'autres, comme les actions explosives, exigent un taux élevé de développement de la force et de la puissance (Gorostiaga et al., 2005) avec des temps de contraction inférieurs à 250 millisecondes (Aagaard et al., 2002). Compte tenu de cette sollicitation du système neuromusculaire au niveau des membres inférieurs, il est nécessaire d'étudier les adaptations musculaires au niveau de l'articulation du genou chez les joueurs de handball (Croisier et al., 2008). Pour évaluer ces adaptations, plusieurs tests existent, tels que le test de répétition maximale (1-RM), les tests de saut vertical (SJ ou CMJ), les EMG et les tests isocinétiques. Des tests isométriques et des mesures EMG effectués par Thorlund et al. (2008) montrent que les stress musculaires et articulaires chez des joueurs de handball élités sont consécutifs à la fatigue engendrée au cours d'un match. Par rapport à d'autres évaluations, le dynamomètre isocinétique fournit des mesures valides et reproductibles (Augustsson et Thomee, 2000; Croisier et al., 2002) pour évaluer la force de l'articulation du genou (Croisier et al., 2007; Kannus, 1994). Bien que l'appareil isocinétique ait été initialement utilisé pour la rééducation musculaire (Calmels et Minaire, 1995), il est devenu une référence pour l'exploration et la recherche sur la force et la prévention des blessures dans le sport (Bernard et Amato, 2009; Davies et Heiderscheit, 1997; Dvir, 2004; Feiring et al., 1990; Kannus, 1994). Peu d'études ont utilisé un dynamomètre isocinétique chez les joueurs de handball. Certains auteurs ont analysé les profils musculaires isocinétiques de joueurs de handball élités masculins et féminins afin d'optimiser la performance (González-Ravé et al., 2014) et de prévenir la rupture des ligaments croisés (Holm et al., 2004). A notre connaissance, aucune étude n'a utilisé un dynamomètre isocinétique afin d'étudier l'évolution des caractéristiques musculaires isocinétiques en fonction de deux parties distinctes d'une saison sportive. C'est ce que nous avons fait au cours des études 1 et 2 présentées ci-après.

2.3 Etude 1

MAURELLI O, BERNARD PL, DUBOIS R, AHMAIDI S, PRIOUX J.

Effects of pre-competitive preparation period on the isokinetic muscular characteristics
in world class handball players.

Journal of Strength and Conditioning Research.

2.3.1 Introduction

Une saison de handball se compose de 2 périodes distinctes : une période de préparation précompétitive (Pc2P) de 6 à 8 semaines et une période de compétition de 9 mois (Bresciani et al., 2010; Gorostiaga et al., 2006; Granados et al., 2008). Habituellement, Pc2P se centre sur le développement des compétences techniques et tactiques en plus des qualités physiques nécessaires à l'optimisation de la performance durant la période compétitive (Argus et al., 2010). Pc2P donne également un aperçu des tensions répétées sur les muscles, qui se produisent tout au long de la saison, et entraînent une fatigue qui s'installe graduellement (Frisch et al., 2011). Dans les sports d'équipe, peu d'auteurs ont étudié Pc2P. Bien que certaines études aient analysé les changements physiques et physiologiques chez des joueurs de football (Frisch et al., 2011; Islegen et Akgun, 1988; Reilly et Thomas, 1977) et de rugby (Argus et al., 2010), quelques études font référence à des changements dans les valeurs de force isocinétique des membres inférieurs. Seuls Orchard et al. (1997) ont analysé spécifiquement les changements de pic de couple (PC) et de la force des quadriceps (Q) et des ischio-jambiers (IJ) chez des joueurs de football australiens. Jusqu'à présent, aucune étude n'a étudié les effets de Pc2P sur les adaptations musculaires chez des joueurs de handball de classe mondiale. Cependant, la mesure de la force et de la puissance musculaire isocinétique par la mesure de PC et de la puissance moyenne (PM) de Q et IJ, avant et après Pc2P, pourrait être utilisée pour illustrer ses effets chez les joueurs de handball et réorienter si nécessaire les méthodes d'entraînement pendant cette période. De plus, l'analyse des ratios, dominant versus non dominant (DNDR), agoniste versus antagoniste (RAA) et mixte (RM), permettrait d'évaluer avec précision les caractéristiques musculaires des joueurs. Le but de notre étude était donc d'analyser les effets de Pc2P, d'une durée de 8 semaines, sur le profil musculaire isocinétique des membres inférieurs chez des joueurs de handball de classe mondiale.

Nous avons émis l'hypothèse que Pc2P était une période appropriée pour développer la performance musculaire isocinétique, permettant aux athlètes de commencer la période de compétition avec des niveaux de force et de puissance optimisés.

2.3.2 Organisation générale

Pour atteindre le but de notre étude, les joueurs de handball étaient monitorés avant et après Pc2P. Tous les sujets étaient familiarisés aux tests isocinétiques. Les tests réalisés avant et après Pc2P étaient toujours réalisés à la même heure du jour et dans le même ordre pour tous les sujets. Le jour de l'évaluation, après un petit-déjeuner standardisé pour tous les joueurs étudiés, des mesures de la masse corporelle et de la masse grasse étaient réalisées. Par la suite, les sujets réalisaient un test isocinétique. Pc2P d'une durée de 8 semaines était organisée pour optimiser les performances à la fin de cette période (Figure 2.2).

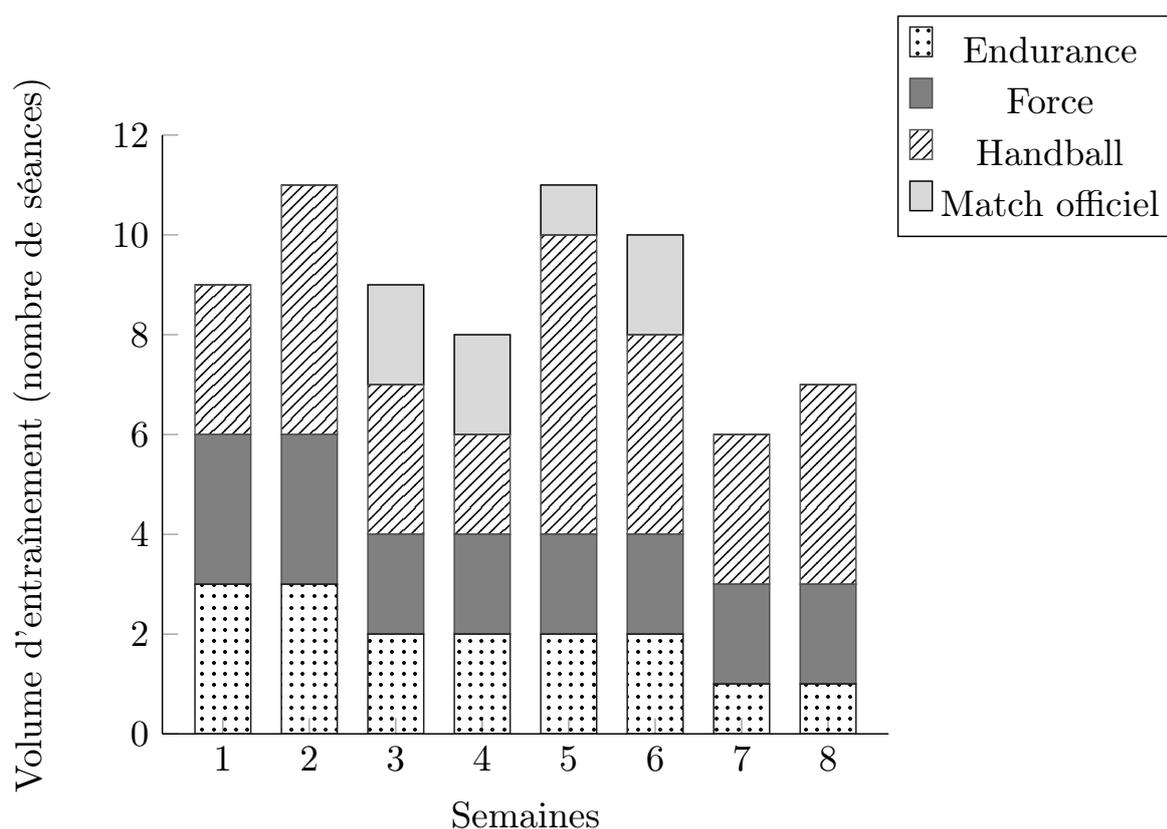


FIGURE 2.2 – Evolution du volume d'entraînement pendant Pc2P.

16 séances (17.8% du volume total d'entraînement) étaient consacrées au développement de la fonction cardiorespiratoire au cours de Pc2P. L'entraînement comprenait trois phases distinctes (Tableau 2.1). La première phase, d'une durée de 2 semaines, axée sur le développement de la capacité aérobie (65-80% de la FC_{max}) a commencé par des séances d'entraînement continu et s'est terminée par des séances de fartlek. Au cours de

cette première phase, les sujets réalisaient 3 séances par semaine. La deuxième phase de l'entraînement cardiorespiratoire, d'une durée de 4 semaines, s'est concentrée sur le développement de la puissance maximale aérobie (85 à 100% de FC_{max}). Cette phase était basée au début, sur du travail à intervalles longs et moyens et, à la fin sur du travail à intervalles courts. Au cours de cette phase, les sujets réalisaient 2 séances par semaine. Enfin, au cours de la troisième phase d'entraînement de la fonction cardiorespiratoire, d'une durée de 2 semaines, les sujets ne réalisaient qu'une seule séance d'entraînement par semaine qui consistait en des répétitions de sprints avec une courte récupération.

TABEAU 2.1 – Organisation du travail de développement de l'endurance pendant Pc2P.

Pc2P								
Semaines	1	2	3	4	5	6	7	8
Objectifs	CA		PMA			PMA-PA		
Modalités	40-50min en continu	Fartlek 30-40min (10sec accélération par min)	8 × 3 min R=3min	(10-12) × 1min R=3min	3 × (8 × 30sec) r=30sec R=4min	3 × (14 × 15sec) r=15sec R=4min	2 × (5 × 30sec) R=4min	2 × (6 × 6sec) r=15sec R=8min
Intensités	65-70% FC_{max}	75-80% FC_{max}	80-90% FC_{max}	90-96% FC_{max}	90-100% FC_{max}	90-100% FC_{max}	90-100% FC_{max}	Non utilisé
Fréquence	Mardi Jeudi Samedi	Mardi Jeudi Samedi	Lundi Vendredi	Lundi Vendredi	Lundi Vendredi	Lundi Vendredi	Mardi	Mardi

Pc2P : période de préparation pré-compétitive; CA : capacité aérobie; PMA : puissance maximale aérobie; PA : puissance anaérobie.

46 séances (51.1% du volume total d'entraînement) étaient consacrées au développement des aspects techniques et tactiques au cours de Pc2P. Le travail de psychomotricité effectué lors de séances permettait d'améliorer les habiletés motrices générales et spécifiques du joueur de handball (coordination, agilité, latéralisation, dissociation segmentaire). Cette thématique représentait 11 séances, soit 12.2% du volume total d'entraînement. Les séances de renforcement musculaire représentaient 17 séances (Tableau 2.2), soit 18.9% du volume total d'entraînement. Lors des 2 premières semaines, 3 séances par semaine étaient axées sur l'endurance de force des membres inférieurs (40 à 60% de 1-RM). Pendant les 4 semaines suivantes, 2 séances par semaine étaient axées sur l'hypertrophie et la force maximale (70 à 90% de 1-RM). Enfin, pendant les 2 dernières semaines, 2 séances par semaine étaient axées sur le développement de la puissance musculaire (50 à 60% de 1-RM).

2.3.3 Sujets

Dix-neuf joueurs de handball masculins, français et étrangers, appartenant à la ligue professionnelle (France), ont participé à nos travaux. Les joueurs avaient une expérience

TABLEAU 2.2 – Organisation du travail de renforcement musculaire pendant Pc2P.

Pc2P								
Semaines	1	2	3	4	5	6	7	8
Objectifs	Endurance de force			Hypertrophie et force maximale			Puissance	
Modalités	Circuit training 30s/exe 4 tours R=5min	3 × 12reps R=1min30	3 × 10reps R= 2min	4× (6-7)reps R=3min	3 × 4reps R=4min	3 × (2reps +6reps) R=4min	3 × 6reps R=2min30	3 × 6reps R=2min30
Exercices	-Squat -Gainage -Leg curl -Gainage -SdT -Leg extension -Gainage -Swing kettle -Gainage	-Squat -SdT -M. Banc -Lunge -Swing kettle	-Hack squat -SdTR -M.Banc -Fentes	-Squat -SdT -Epaulé	-Squat -SdT -M.Banc	-Squat+ saut en pliométrie -SdT + épaulé-jeté -M.Banc + squat 1 pied	-M.Banc -Squat -Epaulé-jeté -Arraché -Plio	-M.Banc -Squat -Epaulé-jeté -Arraché -Plio
Intensités	40% 1-RM	60% 1-RM	70% 1-RM	80% 1-RM	90% 1-RM	60% 1-RM	50% 1-RM	50% 1-RM
Fréquence	Mardi Jeudi Samedi	Lundi Mercredi Vendredi	Lundi Jeudi	Lundi Jeudi	Lundi Jeudi	Lundi Jeudi	Lundi Jeudi	Lundi Jeudi

Pc2P : période de préparation pré-compétitive; SdT : soulevé de terre; SdTR : soulevé de terre roumain; plio : saut en pliométrie; M.Banc : montée de banc.

d'entraînement de 7.6 ± 1.3 ans au plus haut niveau de pratique en France. Les valeurs moyennes (\pm SD) de l'âge, de la taille, de la masse corporelle et de la masse grasse étaient respectivement de 26.6 ± 5.4 ans, 189.5 ± 5.1 cm, 91.8 ± 12.5 kg et $10.2 \pm 2.2\%$. Les critères d'inclusion étaient les suivants : être un homme et être sous contrat avec le club pour un minimum de 3 ans. Les critères d'exclusion étaient liés à la présence de maladies chroniques ou aiguës du genou et/ou des membres inférieurs et de douleur dans le genou et/ou au niveau des membres inférieurs lors des tests, contre-indiquant un exercice concentrique et excentrique maximal. Tous les joueurs avaient rédigé un consentement éclairé pour participer à l'expérience conformément à la Déclaration d'Helsinki. Les protocoles d'étude étaient approuvés par le comité d'éthique locale de l'Université, réalisés en accord avec le médecin-chef et validés par la commission médicale du club.

2.3.4 Protocoles de test

2.3.4.1 Tests isocinétiques

Description de l'appareil

L'appareil, le système Biodex® 3 se compose des éléments suivants (Figure 2.3) :

- Un fauteuil mobile dont l'axe est un levier rigide, placé au regard de l'axe de rotation de l'articulation considérée et reliée au frein électromagnétique qui ajuste la vitesse sélectionnée.
- Un module de commande qui permet la mise en service du matériel, la détermination du mode de travail, la sélection du débattement articulaire et de la vitesse du mouvement, ainsi que le poids du membre en statique.
- Un ordinateur relié au dynamomètre analysant toutes les données de l'exercice et restituant instantanément, sur un écran visuel, les paramètres mesurés. Il offre de plus la possibilité de contrôler, après chaque série de mouvement, les informations de couple de force, de débattement articulaire et de vitesse. Il transcrita dans un second temps, l'ensemble des mesures en un rapport graphique et un rapport chiffré.



FIGURE 2.3 – Illustration de l'appareil Biodex®.

Le rapport graphique sous forme de courbe (Figure 2.4) représente le travail des muscles agonistes et antagonistes aux différentes vitesses déterminées, ici à $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ sur Q et IJ.

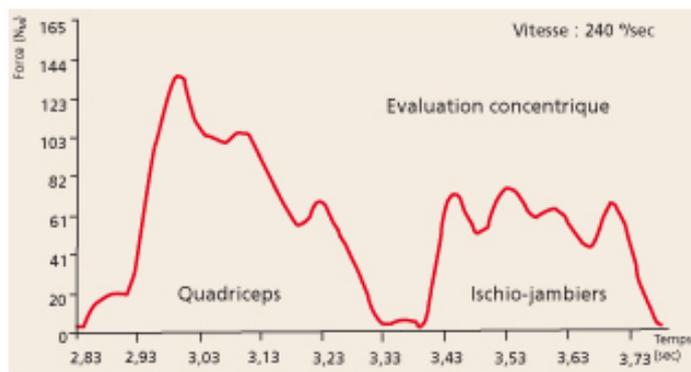


FIGURE 2.4 – Représentation graphique des valeurs de force des fléchisseurs et extenseurs du genou à $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ à l'issue d'un test isocinétique.

Au delà du rapport graphique, le rapport chiffré présente divers paramètres dont les plus valides sont :

- Le moment maximal ou PC : il correspond au couple maximal mesuré en newton-mètre. Sa valeur, son angle et son délai d'apparition sont fonction de la vitesse du mouvement, de l'articulation testée, de l'âge, du sexe, du type d'activités pratiquées ou de la lésion considérée (Kerkour et al., 1987; Leroux et al., 1994; Thorstensson et al., 1976; Tsai et al., 1991).
- Le travail total, mesuré en newton-mètre, représente l'aire comprise sous la courbe et dépend de la vitesse de l'exercice et de l'amplitude du mouvement. Ce paramètre est particulièrement intéressant lors de la réalisation d'un test bilatéral dans des conditions identiques d'évaluation.
- La puissance moyenne correspond au travail total divisé par le temps de travail et s'exprime en watts (W). Ce paramètre semble fiable car bien que la vitesse soit

constante, le fait de diviser le travail réalisé par le temps réel de travail apparaît comme un des meilleurs moyens d'appréciation de la qualité de la contraction musculaire lors de la comparaison de divers sujets entre eux. A ces trois principaux paramètres, il est classique d'associer les ratios qui représentent des indicateurs d'équilibre musculaire aussi nommés " balance ". Ils sont le plus souvent calculés à partir du paramètre de pic de couple mesuré sur chaque groupe musculaire mis en jeu de part et d'autre de l'articulation bien que son expression sur la base de la puissance moyenne constitue aussi un apport significatif.

- Le ratio agoniste/antagoniste reflète l'équilibre entre deux groupes musculaires testés. Ce ratio peut privilégier le paramètre de puissance et non de pic de couple qui utilise deux valeurs survenues à des moments différents pour exprimer un équilibre.
- Le ratio du membre dominant versus le membre non-dominant nous renseigne sur la notion de dysbalance entre les deux cotés testés, c'est à dire le côté gauche versus le côté droit, le côté dominant versus le côté opposé ou encore le côté sain versus le côté lésé dans un contexte de rééducation.
- Le ratio mixte (Croisier et al., 2002) est un rapport prenant en compte un fonctionnement plus physiologique de l'articulation à partir des valeurs des IJ en excentrique à $30^{\circ}.s^{-1}$ et de la valeur des Q en concentrique à $240^{\circ}.s^{-1}$, en référence au protocole le plus classique.

Pour tous ces ratios, il existe des valeurs de références de part et d'autre desquelles il ne faudrait pas trop s'éloigner. Citons de plus le paramètre de fatigue et les paramètres de temps de développement de la force maximale (TDFM) et d'angle d'efficacité maximale (AEM), objet de critiques de part leur niveau de validité limitée, bien que le premier représente, de part la caractérisation de la force explosive, un intérêt dans le milieu sportif. La fatigue au travail, exprimée en pourcentage, correspond à la décroissance de la force au sein d'une série de 20 à 30 mouvements.

Protocole

Les sujets étaient donc évalués à l'aide d'un système Biodex Isokinetic Dynamometer 3®(Biodex Corp, Shirley, NY, USA) avec correction de la gravité. Deux essais bilatéraux des IJ et des Q de l'articulation du genou étaient réalisés avant et après Pc2P en mode concentrique et excentrique. La procédure d'échauffement et de mise en place des sujets était la même avant et après Pc2P. Avant les tests, les sujets s'échauffaient sur une bicyclette ergométrique pendant 5 minutes pédalant contre une charge de 60W à 90 tr/min. Cet échauffement était suivi d'un étirement actif dynamique des muscles psoas, Q, IJ et gastrocnémiens. L'amplitude de mouvement pendant l'essai était de 70° , de -10° à 60° , entre le fémur et le tibia pour limiter la résistance des IJ pendant l'extension. La longueur

du bras de levier était déterminée individuellement, en fonction de la taille de chaque joueur et le coussinet de résistance était placé 2 doigts au-dessus de la malléole interne. Les essais étaient réalisés bilatéralement en position assise avec un angle de flexion de hanches de 110° , une sangle de tronc et de taille, et les membres supérieurs croisés sur le tronc. Chaque sujet était placé dans une position confortable qui ne limitait pas les mouvements du genou. La hauteur et la profondeur du siège par rapport à l'axe de rotation du dynamomètre et la longueur du bras de levier par rapport à l'axe de rotation étaient stockées dans le programme informatique (Biodex Medical, Inc. Shirley, NY, USA) afin de normaliser les conditions de l'essai (Figure 2.5). Au cours des essais, les sujets étaient encouragés verbalement par le même expérimentateur. Chaque test était précédé d'un échauffement standardisé de 2 séries de 5 répétitions à $60^\circ \cdot s^{-1}$ en mode concentrique séparées par 1 minute de récupération. Le protocole commençait par une évaluation dans les modes concentriques sur la jambe dominante, avec une série de 5 répétitions à $60^\circ \cdot s^{-1}$, suivie d'une minute de récupération, puis une nouvelle série de 5 répétitions à $240^\circ \cdot s^{-1}$. Après 1 minute de récupération, l'évaluation de IJ à $30^\circ \cdot s^{-1}$ en mode excentrique concluait la première partie de l'évaluation. Au cours des 5 minutes de récupération suivantes, les sujets étaient installés pour l'évaluation de la jambe non dominante. La procédure était identique (Rochcongar, 2004). Les valeurs de PC et de PM, exprimées en valeurs absolues et normalisées par le poids corporel, étaient utilisées pour calculer ratio dominant versus non dominant (DNDR) et RAA à 60 et $240^\circ \cdot s^{-1}$ en mode concentrique. De plus, l'évaluation en mode excentrique nous permettait de calculer ratio mixte (RM) (valeurs des IJ mesurées à $30^\circ \cdot s^{-1}$ en mode excentrique et celles de Q mesurées à $240^\circ \cdot s^{-1}$ en mode concentrique).



FIGURE 2.5 – Installation du sujet lors du test isocinétique.

2.3.4.2 Tests de vitesse maximale aérobie (VMA)

Le test navette de Leger et Lambert (1982) était utilisé au cours de cette étude. Il reflète idéalement les nombreux changements de direction rencontrés dans l'activité du joueur de handball. De plus, ce test se réalise dans un gymnase, ce qui protège des conditions météorologiques. Tous les joueurs réalisaient ce test jusqu'à épuisement. Lors de ce test, les joueurs étaient encouragés verbalement afin qu'ils courent le plus longtemps possible. Le joueur était considéré comme épuisé s'il s'arrêtait de lui-même (malgré les encouragements appuyés) ou alors parce qu'il ne pouvait plus maintenir la vitesse imposée. Avant le début du test les joueurs étaient familiarisés (à l'aide de démonstrations précises) avec le protocole du test. Au cours de ce test les joueurs devaient enchaîner des navettes entre 2 lignes placées à 20 mètres de distance l'une de l'autre. La vitesse de course était incrémentée de 0.5 km.h^{-1} toutes les minutes. Elle était dictée par des signaux audio à partir d'un magnétophone. L'objectif du test était de réaliser autant d'aller-retour que possible. Le joueur était arrêté lorsque, sur 3 intervalles successifs, il accusait un retard de plus d'un mètre sur une ligne d'aller-retour. La VMA était considérée comme la vitesse au dernier complété. Si le dernier palier n'était pas complet, la VMA retenue était la vitesse au dernier palier complet effectué. FC était enregistrée en continue du début à la fin de chaque test (échauffement et récupération compris) (Polar Electro, Kempele, Finland). Le système de cardiofréquencemètre à doubles électrodes était composé d'une ceinture et d'un boîtier récepteur placés sur le sujet à chaque début de test (Figure 2.6).



FIGURE 2.6 – Ceinture Polar® permettant l'enregistrement de la fréquence cardiaque en continue.

2.3.4.3 Test de 1 Répétition maximale

Le test 1-RM a été mesuré après un échauffement standardisé, qui a débuté par une activation cardiorespiratoire (à 70-75% de la FC_{max} puis une mobilisation articulaire des membres inférieurs. (chevilles, genoux et hanches). Par la suite, les sujets ont commencé par 2 séries de 8-10 répétitions à 50 et 60% de 1-RM. Après ça, ont effectué des 1-RM successifs à partir de 7% de 1-RM et ont augmenté de 5% jusqu'à ce qu'ils atteignent 1-RM. Une récupération de 2 à 3 minutes était observé entre les séries. Chaque sujet a effectué 2 tentatives lors du dernier essai.

2.3.4.4 Mesures anthropométriques

La masse corporelle des joueurs était mesurée le matin à jeun en arrivant au club. Le test était réalisé en tenue légère et sans chaussures, en utilisant une balance Tanita TBF-3000 (Tanita Corporation, Tokyo, Japon). Le pourcentage de masse grasse était estimé à partir de quatre plis cutanés (bicipital, tricipital, sous-scapulaire et supra-iliaque) (Figure 2.7). La méthode utilisée était celle de Durnin et Rahaman (1967). Les plis étaient mesurés à l'aide d'une pince à plis cutanés Harpenden (Harpenden, inc). La masse maigre (FFM) correspondait à la différence entre la masse corporelle mesurée et la masse grasse estimée.



FIGURE 2.7 – Illustration de la méthode des 4 plis cutanés mesurés avec la pince Harpenden.

2.3.4.5 Analyses statistiques

Toutes les données sont présentées sous forme de moyennes (\pm SD). Après avoir effectué un test de normalité, le test non paramétrique de Wilcoxon pour les données appariées était utilisé pour analyser l'influence de Pc2P sur PC, PM, DNDR, RAA et RM. Le niveau de significativité était à $p < 0.05$. Lorsque des différences significatives étaient constatées, la taille de l'effet (ES) était évaluée à partir du "d" de Cohen. Un ES de 0.20-0.60, 0.61-1.19 et ≥ 1.20 était respectivement considéré comme petit, modéré et grand (Hopkins et al., 2009).

2.3.5 Résultats

2.3.5.1 Pic de couple

En mode concentrique à $60^\circ \cdot s^{-1}$, la comparaison de PC avant et après Pc2P ne montre pas de différence significative pour Q qu'il s'agisse du côté dominant ou non dominant. Pour IJ, PC augmente de manière significative des deux côtés ($p < 0.001$). A $240^\circ \cdot s^{-1}$, nos résultats montrent que Q augmente significativement du côté dominant ($p < 0.005$) et également du côté non dominant ($p < 0.002$). Des résultats similaires sont observés pour IJ ($p < 0.001$). En mode excentrique à $30^\circ \cdot s^{-1}$, nos résultats montrent une augmentation significative du côté dominant ($p < 0.005$) et non dominant ($p < 0.01$) (Figure 2.8). A $60^\circ \cdot s^{-1}$ le "d" de Cohen (ES), était de -0.35 (petit) pour IJ du côté dominant et de -0.25 (petit) du

côté non-dominant. A $240^{\circ}.s^{-1}$, ES était de -0.27 (petit) et de -0.34 (petit) pour Q des deux côtés. Pour IJ, ES était de -0.48 (petit) du côté dominant et de -0.44 (petit) du côté non dominant. A $30^{\circ}.s^{-1}$ en excentrique pour IJ, ES était de -0.27 (petit) du côté dominant et de -0.21 (petit) du côté non dominant.

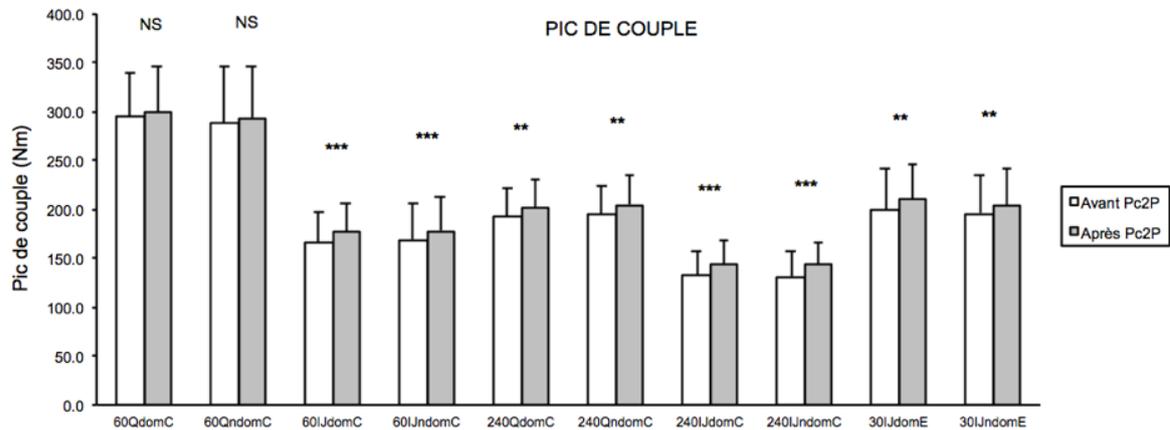


FIGURE 2.8 – Evolution du pic de couple en mode concentrique et excentrique avant et après Pc2P. Q : quadriceps; IJ : ischio-jambiers; 60QdomC : $60^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté dominant; 60QndomC : $60^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté non-dominant; 60IJdomC : $60^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté dominant; 60IJndomC : $60^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté non-dominant; 240QdomC : $240^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté dominant; 240QndomC : $240^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté non-dominant; 240IJdomC : $240^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté dominant; 240IJndomC : $240^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté non-dominant; 30IJdomE : $30^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté dominant; 30IJndomE : $30^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté non-dominant; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$; NS : non significatif.

2.3.5.2 Puissance moyenne

En mode concentrique à $60^{\circ}.s^{-1}$ et à $240^{\circ}.s^{-1}$, nos résultats montrent une augmentation significative de Q du côté dominant ($p < 0.003$) et non dominant ($p < 0.001$). Pour IJ, les valeurs augmentent significativement du côté dominant ($p < 0.001$) à $60^{\circ}.s^{-1}$ et $240^{\circ}.s^{-1}$. Pour le côté non dominant, nos résultats montrent une augmentation significative à $60^{\circ}.s^{-1}$ ($p < 0.003$) et à $60^{\circ}.s^{-1}$ ($p < 0.01$). En mode excentrique, nos résultats montrent une augmentation significative de PM pour IJ du côté dominant ($p < 0.001$) et non dominant ($p < 0.02$) (Figure 2.9). A $60^{\circ}.s^{-1}$, ES était de -0.26 (petit) pour Q du côté dominant et de -0.24 (petit) du côté non dominant. Pour IJ, ES était de -0.30 (petit) du côté dominant et de -0.14 (petit) du côté non dominant. A $60^{\circ}.s^{-1}$, ES était de -0.24 (petit) pour Q du côté dominant et de -0.23 (petit) du côté non dominant. Pour IJ, ES était de -0.29 (petit) du côté dominant et de -0.17 (petit) du côté non dominant. A $30^{\circ}.s^{-1}$ en excentrique pour IJ, ES était de -0.29 (petit) du côté dominant et de -0.17 (petit) du côté non dominant

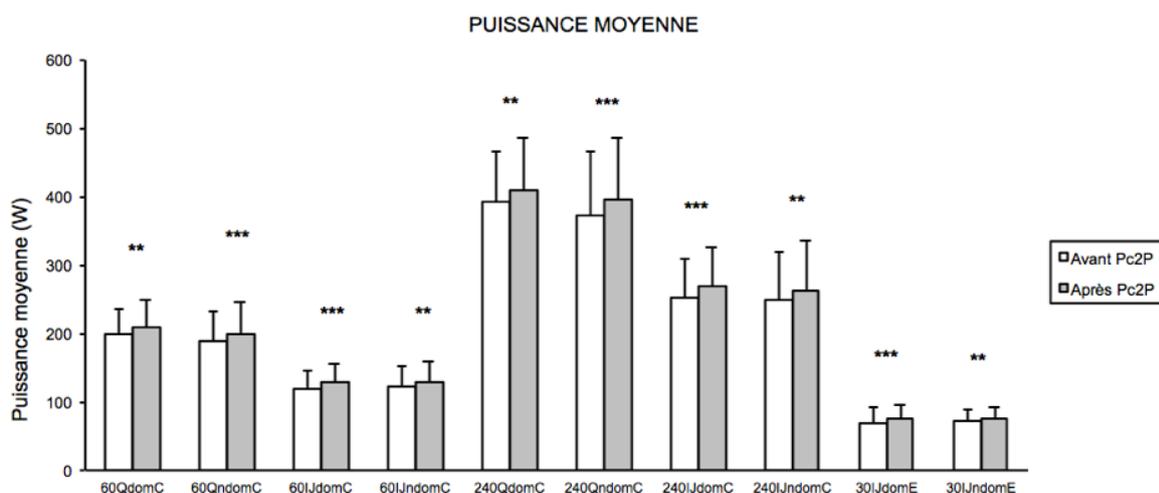


FIGURE 2.9 – Evolution de la puissance moyenne en mode concentrique et excentrique avant et après Pc2P.

Q : quadriceps; IJ : ischio-jambiers; 60QdomC : $60^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté dominant; 60QndomC : $60^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté non-dominant; 60IJdomC : $60^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté dominant; 60IJndomC : $60^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté non-dominant; 240QdomC : $240^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté dominant; 240QndomC : $240^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté non-dominant; 240IJdomC : $240^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté dominant; 240IJndomC : $240^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté non-dominant; 30IJdomE : $30^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté dominant; 30IJndomE : $30^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté non-dominant; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$; NS : non significatif.

2.3.5.3 Ratios dominant/non dominant, agoniste/antagoniste and mixte

A $60^{\circ}.s^{-1}$ et $240^{\circ}.s^{-1}$, les résultats pour DNDR en mode concentrique ne montrent aucune différence significative pour les deux côtés. Pour RAA, nos résultats montrent une différence significative à $60^{\circ}.s^{-1}$ du côté dominant ($p < 0.003$) et du côté non dominant ($p < 0.01$). A $60^{\circ}.s^{-1}$, nos résultats montrent une différence significative des deux côtés ($p < 0.02$). Enfin, RM ne montre aucun changement significatif (Tableau 2.3). L'ES pour RAA à $60^{\circ}.s^{-1}$ était de -0.32 (petit) du côté dominant et de -0.08 (petit) du côté non dominant. A $240^{\circ}.s^{-1}$, ES était de -0.45 (petit) du côté dominant et de -0.16 (petit) du côté non dominant.

TABLEAU 2.3 – Résultats (moyenne et écart-type) des mesures de ratios à partir des tests isocinétiques avant et après Pc2P.

		Concentrique ($60^{\circ}.s^{-1}$)				Concentrique ($240^{\circ}.s^{-1}$)				Ratio mixte	
		DNDR		RAA		DNDR		RAA			
		RQ	RIJ	Dom	NDom	RQ	RIJ	Dom	NDom	Dom	Ndom
Avant Pc2P	m (\pm) SD	1.04	1.01	0.57	0.6	1	1.01	0.68	0.68	1.05	1.02
		0.15	0.19	0.09	0.13	0.15	0.1	0.1	0.12	0.24	0.23
Après Pc2P	m (\pm) SD	1.02	1.01	0.6	0.61	0.99	1.01	0.72	0.7	1.06	1.02
		0.11	0.16	0.09	0.11	0.14	0.07	0.12	0.21	0.21	0.23
	p	0.003	0.01	NS	NS	NS	NS	0.02	0.02	NS	NS

DNDR : ratio de la jambe dominante sur la jambe non dominante; RAA : ratio agoniste/antagoniste sur le même membre. RQ : ratio quadriceps; RIJ : ratio ischio-jambiers; Dom : côté dominant; Ndom : coté non-dominant; Pc2P : période de préparation pré-compétitive; P : significativité; NS : non significatif.

2.4 Etude 2

**MAURELLI O, BERNARD PL, DUBOIS R,
AHMAIDI S, PRIOUX J.**

Effects of the competitive season on the isokinetic muscle parameters changes in world class handball players.

Journal of Strength and Conditioning Research.

2.4.1 Introduction

Certains travaux scientifiques ont étudié les effets d'une saison entière de compétition sur les caractéristiques musculaires isocinétiques en football (Eniseler et al., 2012; Kraemer et al., 2004) et en basketball (Hoffman et al., 1991). D'autres études se sont intéressées aux changements cardiorespiratoires et musculaires (force et puissance maximale) pendant une saison de compétition en handball (Gorostiaga et al., 2006; Granados et al., 2008; Marques et Gonzalez-Badillo, 2006) mais aucune étude n'a été réalisée sur les adaptations musculaires chez des joueurs de handball de classe mondiale au cours d'une saison de compétition. L'objectif de notre travail était donc d'étudier les variations des caractéristiques musculaires isocinétiques des membres inférieurs au cours d'une saison de compétition chez des joueurs de handball de classe mondiale. Notre hypothèse était qu'une saison de compétition, incluant de nombreux matchs et entraînements (Gorostiaga et al., 2006), maintenait les valeurs de force et de puissance musculaire isocinétique à leur valeurs initiales.

2.4.2 Organisation générale

Tout au long de la saison, l'objectif était de maintenir un niveau de performance maximal chez tous les joueurs. Le calendrier d'entraînement exigeait diverses actions, principalement réparties entre les séances d'entraînement technique et tactique, les matchs et les sessions d'entraînement de la force et de l'endurance (Tableau 2.4). Les 39 semaines de compétition, sans compter Pc2P, étaient structurées autour de plusieurs périodes de développement simultané de la force et de l'endurance (Tableau 2.4).

TABLEAU 2.4 – Nombre et distribution des sessions d'entraînement sur l'année.

Distribution des sessions d'entraînement				
Période	Pc2P (8 semaines)	1 ^{re} partie de saison (17 semaines)	2 ^e partie de saison (22 semaines)	Saison entière (47 semaines)
Session Technico tactique	46 (52.3%)	80 (61.6%)	100 (58.8%)	226
Matches	8 (9.1%)	25 (19.2%)	35 (20.6%)	68
Sessions de développement de la force	18 (20.4%)	15 (11.5%)	20 (11.8%)	53
Sessions de développement de l'endurance	16 (18.2%)	10 (7.7%)	15 (8.8%)	41
Total des sessions	88	130	170	388

Les valeurs en absolue représentent le nombre de sessions d'entraînement et les valeurs en relatif représentent la distribution des sessions d'entraînement en fonction des thématiques (Force, endurance, technico-tactique et match).

TABLEAU 2.5 – Programme d'entraînement sur la saison de compétition.

Programme annuel de travail physique												
Semaines	9-10	11-16	17-18	19-22	23-25	28-29	30-31	32-35	36-38	39-40	41-44	45-47
Type d'entraînement en endurance	RSA 5sec sprint r=15sec 2×6rep R=8min	PMA 15sec 110% VMA r=15sec 3×14reps R=4min	PA 30sec sprint r=4min 2×5reps R=5min	RSA 5sec sprint r=15sec 2×6rep R=8min	RSA 5sec sprint r=15sec 2×6reps R=8min	CA 45min 65-75% VMA	PMA 15sec 110% VMA r=15sec 3×14reps R=4min	PA 30sec sprint r=4min 2×5reps R=5min	RSA 5sec sprint r=15sec 2×6reps R=8min	PMA 15sec 110% VMA r=15sec 3×14reps R=4min	PA 30sec sprint r=4min 2×5reps R=5min	RSA 5sec sprint r=15sec 2×6rep R=8min
Nombre de sessions d'entraînement en endurance	2	3	1	2	2	4	2	2	3	2	1	1
Type d'entraînement en force	Explosivité 3×6reps 30%1-RM R=3min Squat SDT M.Banc	Puissance 3×6reps 60%1-RM R=2min30 Squat M.Banc	Force max 3×4reps 90%1-RM R=4min Squat SDT	Puissance 3×6reps 60%1-RM R=2min30 Squat M.Banc	Explosivité 3×6reps 30%1-RM R=3min Squat SDT M.Banc	Hypertrophie 12×10reps 70%1-RM R=2min Squat Presse	Force max 3×4reps 90%1-RM R=4min Squat SDT	Puissance 3×6reps 60%1-RM R=2min30 Squat M.Banc	Explosivité 3×6reps 30%1-RM R=3min Squat SDT M.Banc	Force max 3×4reps 90%1-RM R=4min Squat SDT	Puissance 3×6reps 60%1-RM R=2min30 Squat M.Banc	Explosivité 3×6reps 30%1-RM R=3min Squat SDT M.Banc
Nombre de sessions de force	2	6	1	3	3	6	2	4	3	2	2	2

CA : capacité aérobie; PMA : puissance maximale aérobie; PA : puissance anaérobie; RSA : répétitions de sprints; VMA : vitesse maximale aérobie; 1-RM : 1 répétition maximale;

Reps : répétitions; r = récupération entre les répétitions; R : recuperation entre les séries.

Les semaines 26 et 27 représentent les vacances pour tous les joueurs.

L'entraînement de la force maximale des membres inférieurs était réalisé à 90% de 1-RM. Pour le développement de l'hypertrophie, l'intensité de l'exercice était fixée à 70% de 1-RM. Les séances de développement de puissance, réalisées à des intensités de 50-60% de 1-RM et celles d'explosivité, exécutées à 30% de 1-RM à vitesse maximale, représentaient le plus grand nombre de séquences (Figure 2.10).

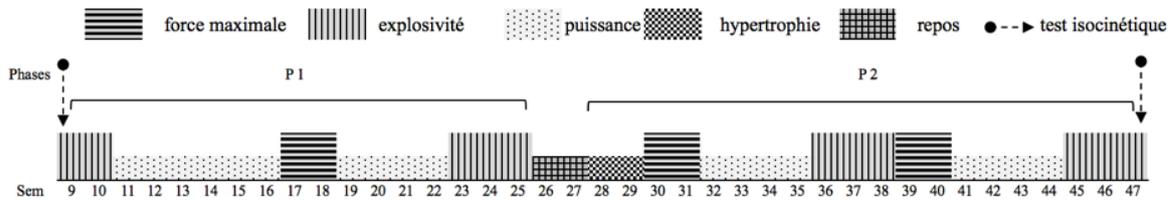


FIGURE 2.10 – Vue d'ensemble des entraînements de développement de la force sur la saison de compétition.

P1 : Phase de compétition 1 ; P2 : Phase de compétition 2 ; Sem : Semaines.

L'entraînement en endurance axé sur le développement de la capacité aérobie était réalisé à des intensités comprises entre 65% et 75% de VMA. L'intensité utilisée pour le développement de la puissance maximale aérobie (PMA) était à 110% de VMA. Enfin, les séances de puissance anaérobie et de répétitions de sprints (RSA) étaient réalisées à intensité maximale. À l'exception des ecchymoses causées par les contacts corporels entre les joueurs, toutes les blessures des membres inférieurs étaient répertoriées tout au long de la saison de compétition (Figure 2.11).

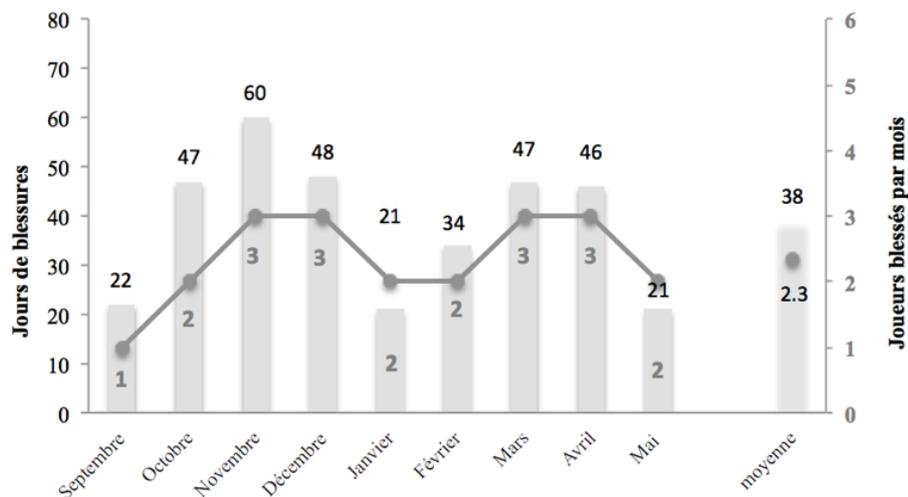


FIGURE 2.11 – Évolution du nombre de blessures des membres inférieurs et du nombre de joueurs blessés pendant toute la saison.

Les histogrammes et les valeurs ci-dessus représentent le nombre de jours cumulatifs de blessures aux membres inférieurs par mois. Les points noirs à l'intérieur de l'histogramme représentent le nombre de joueurs blessés par mois.

Afin de répondre à l'objectif de l'étude, les joueurs étaient suivis pendant toute une saison de compétition. Les mesures des caractéristiques physiques (telles que la taille, la masse corporelle et la masse grasse) et de la force musculaire isocinétique (PC, PM et différents types de ratios) étaient réalisées au début et à la fin de la saison de compétition. Chaque jour d'évaluation, après un petit déjeuner standardisé pour tous les participants, les sujets étaient testés en laboratoire. Ces tests étaient toujours réalisés à la même heure et dans le même ordre pour tous les sujets. Au cours de cette phase expérimentale, les mesures anthropométriques étaient réalisées. Ensuite, chaque sujet réalisait le test isocinétique. Tous les sujets étaient familiarisés avec ce type d'évaluation.

2.4.3 Sujets et protocole

Comme indiqué dans la partie "buts et orientation du travail", nos travaux ont été réalisés à partir d'un seul protocole expérimental conduit sur une saison de handball complète. Les sujets qui ont participé à cette deuxième étude étaient donc les mêmes que ceux présentés dans la première étude. Il en est de même pour les tests isocinétiques, le test 1-RM ainsi que la mesure des caractéristiques anthropométriques et le test de VMA.

2.4.4 Analyses statistiques

Toutes les données sont présentées sous forme de moyennes (\pm SD). Après avoir effectué un test de normalité, le test non paramétrique de Wilcoxon pour les données appariées était utilisé pour analyser l'influence de la saison sportive sur PC, PM, DNDR, RAA et RM. Le niveau de significativité était à $p < 0.05$. Lorsque des différences significatives étaient constatées, la taille de l'effet (ES) était évaluée à partir du "d" de Cohen. Un ES de 0.20-0.60, 0.61-1.19 et ≥ 1.20 était respectivement considéré comme petit, modéré et grand (Hopkins et al., 2009).

2.4.5 Résultats

2.4.5.1 Pic de couple

Nos résultats montrent une diminution significative de PC en mode concentrique à $60^\circ \cdot s^{-1}$ pour Q du côté dominant ($p < 0.001$). Aucune différence significative de PC n'est observée du côté non dominant (Figure 2.12). A $240^\circ \cdot s^{-1}$, aucune différence significative n'est observée pour Q et IJ du côté dominant et non dominant. En mode excentrique à $30^\circ \cdot s^{-1}$, nos résultats ne montrent aucune différence significative du côté dominant et non dominant. Pour ES, il est de 0.19 (petit) pour Q et de 0.38 (petit) pour IJ à $60^\circ \cdot s^{-1}$.

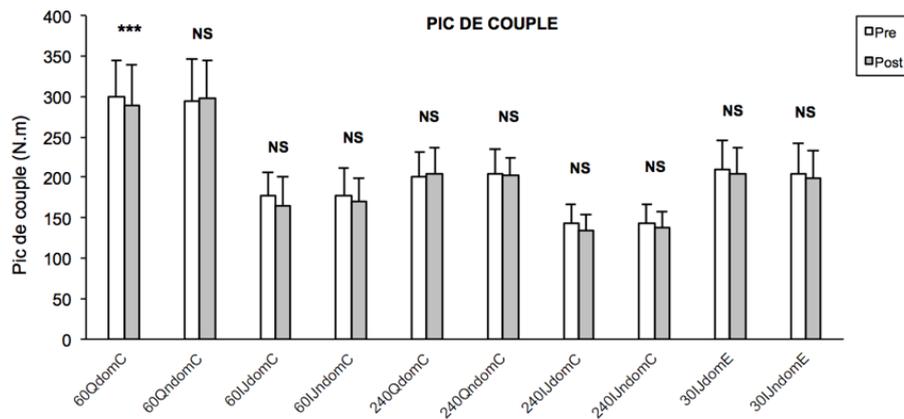


FIGURE 2.12 – Evolution du pic de couple en mode concentrique et excentrique durant une saison entière.

Q : quadriceps; IJ : ischio-jambiers; 60QdomC : $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté dominant; 60QndomC : $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté non dominant; 60IJdomC : $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté dominant; 60IJndomC : $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté non dominant; 240QdomC : $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté dominant; 240QndomC : $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté non dominant; 240IJdomC : $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté dominant; 240IJndomC : $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté non-dominant; 30IJdomE : $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté dominant; 30IJndomE : $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté non-dominant; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$; NS : non significatif.

2.4.5.2 Puissance moyenne

En mode concentrique à $60^{\circ} \cdot s^{-1}$, nos résultats ne montrent aucune différence significative pour Q et IJ pour les deux côtés (Figure 2.13). A $240^{\circ} \cdot s^{-1}$, aucune différence significative n'est observée pour Q du côté dominant et du côté non dominant et pour IJ du côté non dominant. Nos résultats montrent une diminution significative ($p < 0.001$) pour IJ du côté dominant. En mode excentrique à $30^{\circ} \cdot s^{-1}$, une augmentation significative ($p < 0.001$) est observée du côté dominant et du côté non dominant. Pour ES, il est de 0.44 (petit) en pour IJ à $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ pour le côté dominant, 0.10 (petit) pour IJ à $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ pour le côté dominant et de 0.15 (petit) pour IJ à $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ pour le côté non dominant.

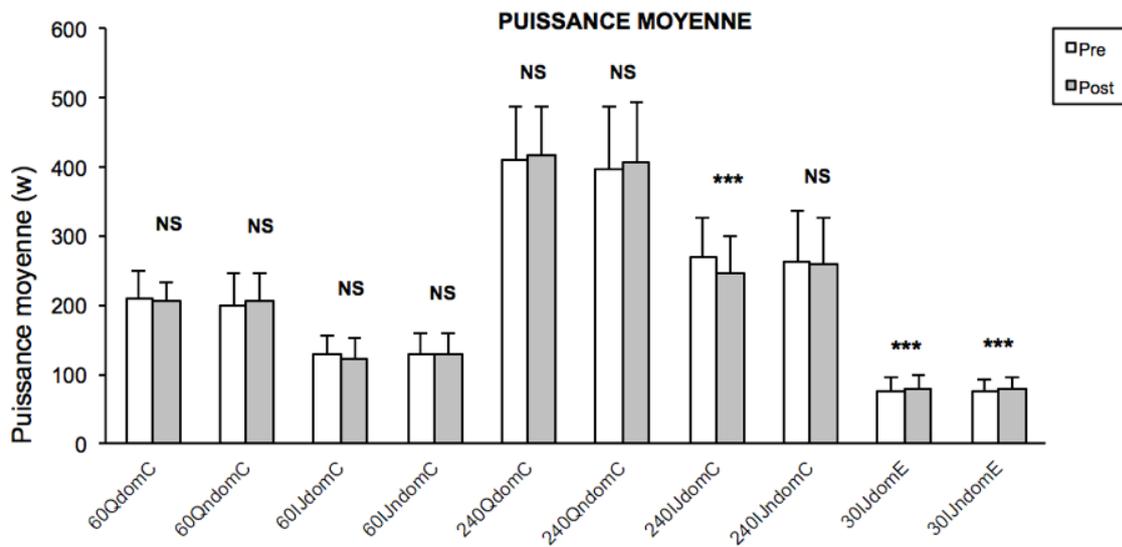


FIGURE 2.13 – Evolution de la puissance moyenne en mode concentrique et excentrique durant une saison entière.

Q : quadriceps; IJ : ischio-jambiers; 60QdomC : $60^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté dominant; 60QndomC : $60^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté non dominant; 60IldomC : $60^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté dominant; 60IldomC : $60^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté non dominant; 240QdomC : $240^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté dominant; 240QndomC : $240^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur Q du côté non dominant; 240IldomC : $240^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté dominant; 240IldomC : $240^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté non-dominant; 30IldomE : $30^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté dominant; 30IldomE : $30^{\circ}.s^{-1}$ en concentrique sur IJ du côté non-dominant; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$; NS : non significatif.

2.4.5.3 Ratios dominant/non dominant, agoniste/antagoniste et mixte

En mode concentrique à $60^{\circ}.s^{-1}$, nos résultats montrent une diminution significative ($p < 0.03$) de DNDR pour Q (Tableau 2.6). Une diminution significative de RAA est également observée à $240^{\circ}.s^{-1}$ du côté dominant ($p < 0.01$). Aucun changement significatif n'est observé pour RM.

TABLEAU 2.6 – Résultats (moyenne et écart-type) des mesures de ratios à partir des tests isocinétiques avant et après Pc2P.

		Ratio concentrique ($60^{\circ}.s^{-1}$)				Ratio concentrique ($240^{\circ}.s^{-1}$)				Ratio mixte	
		DNDR		RAA		DNDR		RAA			
		RQ	RIJ	Dom	NDom	RQ	RIJ	Dom	NDom	Dom	Ndom
Pre	m (\pm) SD	1.03	1.01	0.60	0.61	0.99	1.01	0.72	0.70	1.06	1.02
		0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.11	0.1	0.2
Post	m (\pm) SD	0.98	0.97	0.57	0.58	1.01	0.98	0.67	0.69	1.02	0.99
		0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
	p	0.03	NS	NS	NS	NS	NS	0.01	NS	NS	NS
	ES	S 0.44						M 0.65			

DNDR : ratio de la jambe dominante sur la jambe non dominante; AAR : ratio agoniste/ antagoniste sur le même membre. RM : ratio mixte (excentrique à $30^{\circ}.s^{-1}$ sur IJ et concentrique à $240^{\circ}.s^{-1}$ sur Q); RQ : ratio quadriceps; RIJ : ratio ischio-jambiers; Dom : côté dominant; Ndom : coté non-dominant; P : significativité; NS : non significatif; ES : taille de l'effet ("d" de cohen) quand une différence significative a été observée; S : petit; M : modéré.

2.5 Discussion des études 1 et 2

Les résultats de nos 2 premières études montrent que le profil musculaire de joueurs de handball de très haut niveau peut évoluer de manière significative au cours d'une saison complète de compétition. L'objectif de notre première étude était d'analyser les effets de Pc2P sur le profil musculaire isocinétique de l'articulation du genou de joueurs de handball de très haut niveau. Notre hypothèse était que Pc2P serait une période appropriée pour développer la performance musculaire isocinétique, permettant ainsi aux joueurs de handball de commencer la période de compétition avec des niveaux optimisés de force et de puissance. En mode concentrique à 60 et 240°.s⁻¹ nos résultats montrent un effet significatif de Pc2P sur le développement de PM au niveau de Q et IJ du côté dominant et du côté non dominant. Ils montrent également des effets plus limités de Pc2P au niveau de Q, où aucune augmentation de PC n'a été observée en mode concentrique à 60°.s⁻¹ du côté dominant et du côté non dominant.

Ces résultats peuvent s'expliquer de différentes façons. Premièrement, la durée de Pc2P (8 semaines) semble être suffisante pour induire une amélioration significative de la majorité des valeurs de force et de puissance au niveau de IJ et dans une moindre mesure au niveau de Q. Deuxièmement, nos résultats pourraient s'expliquer par l'entraînement proposé pendant Pc2P, puisqu'une part relativement importante des sessions d'entraînement (18.9%) était consacrée à l'entraînement de la force. Le gain en force et en puissance après Pc2P peut aussi s'expliquer par le déconditionnement musculaire des joueurs au cours des 5 semaines d'interruption d'entraînement qui ont précédé Pc2P. En effet, [Marques et Gonzalez-Badillo \(2006\)](#) montrent une diminution significative de la force développée lors de tirs en handball après 7 semaines d'interruption de l'entraînement et [Andersen et al. \(2005\)](#) montrent une force isocinétique plus faible chez des adultes sédentaires après une période de 12 semaines d'inactivité. Les augmentations significatives notées plus haut sont observées malgré la nécessité de manager le développement optimal des qualités de force et d'endurance, ainsi que celui des séances technico-tactiques (51.1%) et des matchs de préparation (n = 8). Plusieurs travaux scientifiques ont étudié les effets du développement concomitant de la force et de l'endurance. Certaines de ces études montrent que les gains de force sont inhibés par l'ajout de séquences d'entraînement en endurance ([Docherty et Sporer, 2000](#)), principalement en raison d'une interférence physiologique entre deux voies de signalisation. La première voie, mTOR, stimule des facteurs de croissance comme IGF-1, optimisant ainsi la synthèse des protéines donc l'augmentation de la force et de l'hypertrophie. La seconde voie, AMPK, stimule le métabolisme des hydrates de carbone et des acides gras ([Foretz et al., 2006](#)), ce qui inhibe mTOR et donc limite ses réponses à l'entraînement ([Fyfe et al., 2014](#)). Afin de limiter les effets négatifs de cet entraînement concurrentiel, une revue de littérature récente ([Fyfe](#)

et al., 2014) recommande de ne pas dépasser 2 à 3 séances d'endurance par semaine, d'éviter les courses longues et de toujours placer la séance de force ou de puissance avant la séance d'endurance. Ces potentielles interférences pourraient en partie expliquer le manque de changements significatifs des valeurs de force à faible vitesse angulaire observées au niveau de Q et pas au niveau de IJ. IJ n'est pas affecté par ces interférences grâce à des sessions d'entraînement régulières qui incluaient le renforcement musculaire spécifique de la chaîne postérieure et grâce aussi aux multiples flexions de genoux réalisées lors de la pratique du handball. La réduction du nombre d'exercices de renforcement impliquant la chaîne musculaire antérieure des cuisses pourrait être une autre explication possible. Nous adaptions ainsi le contenu de la session en limitant la charge au niveau de Q car ce groupe musculaire est déjà très sollicité en handball. Nos résultats sont conformes avec ceux d'études antérieures. Reilly et Thomas (1977) montrent qu'une Pc2P d'une durée de six semaines n'améliore pas de manière significative la force des muscles de l'articulation du genou chez des joueurs de football tandis que Dudley et Djamil (1985) observent une amélioration significative de la force des muscles de l'articulation du genou chez des hommes et des femmes entraînés mais uniquement à des vitesses angulaires élevées. L'augmentation significative de PC au niveau de IJ et de Q à une vitesse angulaire élevée ($240^{\circ} \cdot s^{-1}$) peut s'expliquer par la répétition d'actions explosives en handball (Karcher et Buchheit, 2014). En effet, comparativement à d'autres sports, tel que le rugby, l'entraînement en handball inclut un nombre élevé de différents types de séances (entraînements technico-tactiques et jeu sur demi-terrain) dès la première semaine de Pc2P afin d'améliorer les compétences motrices spécifiques du handball, telles que les passes et les tirs. Ainsi, les joueurs de notre équipe professionnelle ont participé à 46 sessions d'entraînement spécifiques pendant Pc2P. Au cours de chacune de ces sessions, beaucoup d'actions ont été exécutées à des vitesses élevées. L'étude réalisée par Behm et Sale (1993) montrent que les plus grands gains de force sont observés à des vitesses proches des vitesses d'entraînement. Ces résultats observés à haute intensité indiquent que les effets significatifs sur la force isocinétique exprimée à haute vitesse angulaire sont le résultat de la combinaison des sessions d'entraînement en force et des sessions d'activités spécifiques au handball proposées pendant Pc2P (Eniseler et al., 2012). Les résultats de notre étude sont cependant plus prononcés pour les valeurs de puissance ce qui est en accord avec le programme d'entraînement (Tableau 2.2). En effet, pendant Pc2P l'objectif prioritaire était de développer les indices de puissance et non de force maximale. Cet objectif est en accord avec la nécessité de réaliser des mouvements à grande vitesse angulaire dans la plupart des sports d'équipe pratiqués au plus haut niveau. Ces mouvements sont systématiquement répétés pendant les matchs, particulièrement pendant des sprints sollicitant l'articulation du genou à des vitesses de l'ordre de $600-700^{\circ} \cdot s^{-1}$ (Sale et al., 1990). Des mouvements segmentaires réguliers réalisés à des vitesses élevées au cours de la pra-

tique du handball permettent les adaptations motrices à vitesses élevées (Eniseler et al., 2012). Pc2P est aussi une période clé pour renforcer les groupes musculaires vulnérables. Pour prévenir les blessures, le renforcement de IJ était systématiquement inclus au cours des séances de musculation. Cela peut expliquer l'augmentation significative de PC au niveau de IJ à une vitesse angulaire faible ($60^{\circ} \cdot s^{-1}$). De plus, l'augmentation significative de PC observée à $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ en mode excentrique peut probablement s'expliquer par la mise en place des routines de prévention des blessures au cours de cette période. En effet, les besoins mécaniques de ce groupe musculaire, régulièrement contraint par la phase d'étirement lors de la pratique sportive, constituent l'une des explications possibles concernant les améliorations observées en mode excentrique.

Le besoin constant d'optimiser la performance nécessite également de prendre en compte les caractéristiques musculaires individuelles ainsi que l'évaluation de l'influence de l'entraînement sur l'équilibre musculaire de l'articulation du genou (Aagaard et al., 1998; Andrade et al., 2012; Croisier et al., 2007; Kannus, 1994; Kong et Burns, 2010). Concernant DNDR, nos résultats ne montrent pas de changements significatifs. Au début de Pc2P ce rapport était déjà bon comme le montre la valeur proche de 1.0. Il apparaît donc normal que ce ratio ne change pas en 8 semaines. Ces résultats indiquent aussi que la pratique du handball n'affecte pas significativement les déséquilibres majeurs entre la jambe dominante et la jambe non dominante, même si les joueurs de handball utilisent préférentiellement la même jambe lors du tir. Pc2P induit une augmentation significative de RAA à $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ et $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ pour les côtés dominant et non dominant. Néanmoins, les petits changements proches des valeurs de référence, i.e., de 0.6 (à faible vitesse) à 0.7 (à haute vitesse), limitent l'interprétation des données (Croisier et al., 2008; Dvir, 2004). La durée de Pc2P semble trop courte pour permettre des changements dans l'équilibre musculaire ou pour induire des adaptations physiologiques. Concernant ces 2 ratios, certains auteurs (Croisier et al., 2008; Denot-Ledunois et Fossier, 1994; Knapik et Ramos, 1980) ont critiqué leur utilisation en raison de leur éloignement de la réalité fonctionnelle et proposent l'utilisation de RM. Ce dernier ratio mesure la force maximale au niveau de Q à une vitesse angulaire élevée ($240^{\circ} \cdot s^{-1}$ en mode concentrique) par rapport à celle mesurée au niveau de IJ à une faible vitesse angulaire ($30^{\circ} \cdot s^{-1}$ en mode excentrique), ce qui pourrait être plus utile pour prévenir les dommages au niveau de IJ. Nos résultats ne montrent aucun changement significatif de ce ratio avec un maintien à une valeur légèrement supérieure à 1.0 (Table 2.6). Cependant, les résultats sont satisfaisants et suggèrent que Pc2P n'est pas nécessairement adapté à un rééquilibrage des ratios pour prévenir les blessures pour plusieurs raisons. L'entraînement physique pendant Pc2P est principalement centré sur le développement de la force et de l'endurance. Etant donné la part importante de l'entraînement consacrée aux composantes techniques et tactiques (51.1%), qui sont des facteurs essentiels de la performance en handball, il serait difficile d'augmenter da-

vantage la charge d'entraînement globale sans un risque d'overreaching ou d'overtraining. De plus, la durée de Pc2P n'est peut-être pas suffisamment importante pour impacter efficacement les déséquilibres musculaires, même si le programme d'entraînement inclut régulièrement des exercices de prévention. Nos résultats montrent qu'une Pc2P d'une durée de 8 semaines augmente significativement PC, excepté PC à $60^{\circ}.s^{-1}$, et PM au deux vitesses, 60 et $240^{\circ}.s^{-1}$ du côté dominant et du côté non dominant. Les ratios ne changent pas pendant cette période, excepté pour le ratio RAA. Ainsi, l'étude montre que 8 semaines de Pc2P n'entraînent pas un déséquilibre majeur des muscles de l'articulation du genou chez les joueurs de handball de classe mondiale.

Au cours de notre deuxième travail nous avons étudié les éventuels changements des paramètres musculaires isocinétiques au cours d'une saison complète de compétition. En mode concentrique, excepté pour les valeurs de PC à $60^{\circ}.s^{-1}$ au niveau de Q et pour les valeurs de PM à $240^{\circ}.s^{-1}$ au niveau de H du coté dominant, qui montrent une diminution significative, la tendance générale de nos résultats est que 39 semaines d'entraînement de haute intensité et de compétitions de haut niveau ne provoquent pas de changements significatifs des valeurs de force et de puissance musculaire au niveau de l'articulation du genou validant ainsi notre hypothèse expérimentale. Nos résultats corroborent ceux de [Silva et al. \(2011\)](#) qui montrent que des joueurs de football professionnels participant à des compétitions maintiennent à leur niveau initial les valeurs de force isocinétique au niveau de Q et IJ. Nos résultats sont également en accord avec les travaux d'[Eniseler et al. \(2012\)](#), réalisés chez des footballeurs professionnels turcs de niveau Super League, qui ne montrent pas d'effet significatif d'une période de 24 semaines d'entraînement et de compétition sur les valeurs de PC mesurées à $60^{\circ}.s^{-1}$, ou sur les valeurs de force maximale mesurées à des vitesses angulaires élevées ($300^{\circ}.s^{-1}$ et $500^{\circ}.s^{-1}$). Comme évoqué précédemment lors de la discussion des résultats de notre première étude, une des potentielles explications de la tendance générale de nos résultats serait que l'entraînement concomitant de la force et de l'endurance nuirait au développement des qualités de force principalement en raison d'une interférence physiologique entre deux voies de signalisation, mTOR et AMPK ([Docherty et Sporer, 2000](#); [Nader, 2006](#)). Une autre explication de la tendance générale de nos résultats pourrait être liée au haut niveau de pratique des joueurs. En effet, selon les travaux d'[Hakkinen et Komi \(1981\)](#), les adaptations liées à l'entraînement dépendent principalement du niveau initial (avant entraînement) du sportif. Étant donné que les qualités physiques des handballeurs étaient déjà élevées au début de notre étude, leur amélioration serait de fait moins importante. Les valeurs de fin de saison, observées dans notre étude, montrent donc que la pratique régulière du handball ($n = 180$ séances technico-tactiques et $n = 68$ matchs), associées à des séances d'entraînement de la force ($n = 35$) et de l'endurance ($n = 25$) (Tableau 2.4), sans prendre en compte Pc2P, (i) permettent de maintenir à leur niveau initial les paramètres de la force isocinétique (PC et

PM à 60 et $240^\circ \cdot s^{-1}$) au niveau de Q et de IJ, du côté de la jambe non dominante et (ii) induisent une diminution significative des valeurs de PC en mode concentrique à $60^\circ \cdot s^{-1}$ au niveau de Q, du côté de la jambe dominante. A un niveau de compétition élevé, beaucoup de passes et de tirs (tirs en suspension, tirs en appui avec et sans élan) sont réalisés pendant les séances d'entraînement technico-tactiques ou les matchs (Michalsik et al., 2015a; Povoas et al., 2014). Comme la plupart des lancers à bras cassés (Fradet et al., 2004), un tir ou une passe en handball favorise l'utilisation exclusive d'un seul bras (côté dominant) et l'utilisation de la jambe opposée (côté non dominant). Cela est également vrai en ce qui concerne le duel (1 vs. 1) (Michalsik et al., 2015a) impliquant une poussée latérale dynamique pendant laquelle le joueur utilise le plus souvent le membre inférieur opposé (non dominant) à la main portant la balle (Fradet et al., 2004). D'un point de vue biomécanique, cette organisation motrice permet un meilleur équilibre et donc un meilleur transfert de force (Van Den Tillar et Ettema, 2009). Le bassin et le tronc peuvent également mieux pivoter et donc induire une vitesse angulaire plus grande dans la phase d'accélération de la main portant le ballon. Cette organisation motrice permet également une meilleure automatisation de la coordination entre la course, le saut et le tir (Fradet et al., 2004). Cependant, cette organisation motrice entraîne un effort musculaire plus important au niveau de la jambe non dominante, expliquant en partie le maintien de ces indices de force à leurs niveaux initiaux. Plusieurs explications peuvent être prises en compte pour justifier la diminution significative des valeurs de PC à $60^\circ \cdot s^{-1}$ au niveau de Q, du côté dominant. Premièrement, le côté dominant est moins sollicité au cours des tirs, des passes et des 1 vs. 1 régulièrement utilisés lors de la pratique du handball. En handball, des actions tels que des sauts et des tirs explosifs sont réalisées avec une seule jambe (González-Ravé et al., 2014). Cette habileté motrice spécifique pourrait en partie expliquer la diminution significative observée du côté dominant à la fin de la saison de compétition. Cette diminution significative pourrait être compensée par des séances régulières de renforcement musculaire, mais la quantité de ces séances était probablement insuffisante pendant la saison de compétition (Figure 2.10). En effet, au cours d'une saison sportive, une équipe élite de handball joue à intervalle régulier avec une moyenne de 2 matchs par semaine pour un total d'environ 60 matchs officiels qui se répartissent entre le championnat national, les coupes nationales, la ligue européenne et le trophée des champions. En plus de ces matchs, les joueurs ont participé à 180 séances d'entraînement axées sur le travail technique et tactique. Ce cadre spécifique au handball de haut niveau limite le temps consacré au développement des capacités physiques et, plus particulièrement, le temps consacré au développement des qualités de force musculaire (Holm et al., 2004; Schneider et al., 1988; Silva et al., 2013). Au niveau de IJ, les valeurs de PM montrent une diminution significative ($p < 0.001$) du côté dominant en mode concentrique à $240^\circ \cdot s^{-1}$ et une augmentation significative ($p < 0.001$) en mode excentrique à $30^\circ \cdot s^{-1}$ des côtés domi-

nant et non dominant. Ces résultats montrent que la sollicitation permanente de IJ, sous tension maximum lors d'actions de jeu tels que des changements de direction, des accélérations et des décélérations (Stolen et al., 2005), ne permet pas de maintenir, à leur niveau initial, les valeurs de PM mesurées en mode concentrique à $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ du côté de la jambe dominante, l'organisation motrice spécifique au handball exigeant moins d'efforts. Deuxièmement, afin d'optimiser l'efficacité de ces actions et de prévenir autant que possible les blessures, un programme approprié était proposé tout au long de la saison compétitive. Ce programme comprenait des exercices ciblés et individualisés qui étaient réalisés dans tous les modes de contraction. Le plus souvent ces exercices étaient réalisés en mode excentrique afin de reproduire la phase d'allongement retrouvée dans de nombreuses phases d'accélération rapide avec arrêts ainsi qu'au cours de sprints courts avec changement de direction (Buchheit et al., 2012), qui sont régulièrement impliqués dans les lésions musculaires des membres inférieurs. Cela pourrait expliquer l'augmentation significative ($p < 0.001$) observée au niveau de IJ à $30^{\circ} \cdot s^{-1}$.

Au cours de notre travail nous avons aussi étudié les ratios suivants RAA, DNDR et RM. Des auteurs tels que Croisier et al. (2002) montrent, en effet, que la force des muscles des extenseurs et fléchisseurs du genou doit être bien équilibrée pour réduire les risques de blessures au niveau des membres inférieurs. Nos résultats montrent une diminution significative de RAA ($p < 0.01$) du côté dominant à $240^{\circ} \cdot s^{-1}$. Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle l'organisation motrice spécifique du joueur de handball (entre le bras porteur du ballon et la jambe opposée) sollicite beaucoup moins le côté dominant. Cependant le ratio de fin de saison reste dans la fourchette des valeurs de références théoriques (entre 0.6 et 0.7) en mode concentrique (Coombs et Garbutt, 2002). Les résultats concernant DNDR montrent une diminution significative au niveau de Q à $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ ($p < 0.03$). Cependant, la valeur de ce ratio mesurée à la fin de la saison de compétition reste proche de 1.0. Cette valeur représente la norme de référence du point de vue fonctionnel et clinique (Coombs et Garbutt, 2002) bien qu'il existe une controverse sur la notion d'équilibre des forces bilatérales du genou (Tol et al., 2014). En effet, quelques auteurs (Fousekis et al., 2010; Thorstensson et al., 1976) considèrent qu'une différence de plus de 10% entre les valeurs mesurées d'un côté comparativement à celles mesurées de l'autre côté peut être considérée comme un déséquilibre. Ce n'est pas le cas concernant nos résultats ce qui indique que la pratique régulière du handball n'altère pas les ratios musculaires. Concernant RM, nos résultats ne montrent pas de changements significatifs entre le début et la fin de la saison de compétition, avec des valeurs situées autour de 1.0 (1.02 contre 0.99), qui est considérée comme la valeur de référence (Thorstensson et al., 1976). Le suivi longitudinal des blessures, effectué par le personnel médical sur la base de la quantification des blessures aux membres inférieurs, montre 2 périodes pendant lesquelles les blessures augmentent : de novembre à décembre et de mars à avril (Figure

2.11). Cette observation devrait servir de référence pour l'analyse préventive des troubles musculo-squelettiques fréquemment rencontrés chez les athlètes de haut niveau et, dans la mesure du possible, devrait encourager tous les entraîneurs à gérer individuellement la préparation de leurs athlètes en fonction de leur profil musculaire.

2.5.1 Limites méthodologiques

Une des limites communes à nos deux études est que les groupes musculaires étaient testés à l'aide d'un dynamomètre isocinétique dans le cadre d'une approche monoarticulaire, bien que les sports se pratiquent dans un système fermé, ce qui suggère que plusieurs groupes musculaires contribuent à la performance athlétique. La deuxième limite commune à nos deux études est qu'il nous a été impossible d'utiliser un groupe contrôle compte tenu du niveau de jeu de l'équipe. Enfin, concernant l'étude 2, il aurait été intéressant de procéder à une autre évaluation vers la mi-saison pour avoir un contrôle intermédiaire sur l'évolution des valeurs. Les contraintes inhérentes à une équipe avec ce niveau de compétition (2 matchs par semaine) ainsi que le calendrier international ne nous ont pas permis d'atteindre cet objectif.

2.5.2 Applications pratiques

Pour augmenter l'efficacité du programme d'entraînement et optimiser la performance au cours de la saison, le préparateur physique devra multiplier les sessions d'entraînement dédiées au développement de la force et de la puissance musculaire au cours de Pc2P. En effet, les travaux de [Silva et al. \(2013\)](#) montrent, chez des joueurs de football professionnels, qu'un niveau initial important de force et de puissance musculaire, induit une diminution moins marquée des performances pendant les matchs. Compte tenu de ces résultats, les joueurs devraient commencer la saison avec des niveaux de force et de puissance les plus élevés possible afin de mieux tolérer la saison compétitive qui peut durer 9 à 10 mois, avec un à deux matchs par semaine. Ensuite, les calendriers de plus en plus chargés ne permettent pas de maintenir la force et la puissance musculaire. Cela a été compris depuis longtemps en rugby, sport dans lequel les 3 premières semaines de Pc2P sont presque exclusivement réservées au travail physique. En handball, il y a plusieurs possibilités pour inverser la tendance actuelle. Comme il n'est pas possible d'allonger la durée de Pc2P, il pourrait être avantageux de modifier le programme d'entraînement en volume ou en intensité ou bien les deux. Pour optimiser Pc2P, il serait intéressant d'augmenter le nombre de sessions d'entraînement centrées sur le développement de la force maximale. Pour cette raison, l'organisation des séances d'entraînement pourrait être modifiée avec une première semaine qui serait centrée sur un travail en endurance de force, suivie d'une semaine centrée sur un travail d'hypertrophie, suivie directement par 3 se-

maines centrées sur un travail de la force maximale. Ces 3 dernières semaines pourraient être suivies par deux semaines centrées sur le développement de la puissance à l'aide de la méthode des contrastes de charges (alternance, toujours à vitesse maximale, de charges lourdes et de charges légères). La dernière semaine serait exclusivement consacrée au développement de l'explosivité. Cette nouvelle stratégie de programmation permettrait d'avoir cinq semaines d'entraînement dédiées à la force maximale au lieu des trois utilisées au cours de notre étude. Au regard de la tendance générale des résultats de l'étude 2, qui montrent qu'une saison complète de compétition chez des joueurs de handball de classe mondiale n'induit pas de changements significatifs des valeurs de force et de puissance musculaire au niveau de l'articulation du genou, il serait intéressant d'augmenter ces valeurs au début de la saison afin de conserver ces valeurs élevées le plus longtemps possible pendant la saison. Et comme nous venons de le voir au cours de l'étude 1, la période la plus appropriée pour le faire serait la période Pc2P. En effet, le développement intensif de la force et de la puissance pendant Pc2P maximiserait les effets à long terme, retardant une diminution trop rapide et trop importante des valeurs de force et de puissance. De plus, malgré l'augmentation du nombre de matchs sur une année de compétition, et afin d'éviter que les valeurs ne diminuent et éventuellement obtenir une augmentation de ces valeurs plutôt qu'un maintien, l'intégration régulière de séances d'entraînement dédiées à la force devient une nécessité pendant les périodes de compétition. Cela pourrait se faire au détriment d'un certain nombre de sessions d'entraînement tactiques et techniques spécifiques afin de ne pas alourdir la charge de travail des athlètes. Enfin, étant donné (a) l'importance d'actions, tels que des sauts ou des 1 vs. 1, régulièrement retrouvées au niveau des membres inférieurs lors d'actions réalisées par des joueurs de handball à des niveaux élevés de compétition et (b) les corrélations observées entre les valeurs de force isocinétique des extenseurs du genou et les valeurs de détente verticale (Saliba et Hrysomallis, 2001), il pourrait être intéressant d'intégrer à des entraînements spécifiques en handball des exercices ayant pour objectifs de maintenir les qualités de force et de puissance musculaire. Des exercices de saut verticaux et horizontaux utilisant la contraction pliométrique (qui favorise la coordination intermusculaire) permettraient de maximiser les niveaux de force et de puissance chez des joueurs de handball.

2.6 Etude 3

**MAURELLI O, MICHALSIK LB, SCHMITT L,
BRUN JF, DUBOIS R, AHMAIDI S, PRIOUX J.**

Effects of an entire season on physical, biological and psychological changes in
world-class handball players.

Journal of Strength and Conditioning Research.

(article en soumission)

2.6.1 Introduction

Depuis l'arrivée du professionnalisme en 2007, les saisons se sont allongées avec une augmentation des périodes intensives d'entraînement et de compétition entraînant une fatigue accrue des joueurs, qui peut induire des adaptations non fonctionnelles (blessures, diminution du bien-être et de la performance, perturbations biologiques,...) (Banfi et al., 2006; Gorostiaga et al., 2006; Nunes et al., 2014). Afin de mieux comprendre ces changements et leurs effets, il devient essentiel de monitorer les athlètes de manière régulière à l'aide de plusieurs marqueurs. La quantification de la charge d'entraînement (CE), imposée par les séances d'entraînement et par les compétitions, constitue une étape fondamentale pour comprendre la relation dose-réponse entre le stress des matchs et des entraînements et les adaptations physiologiques consécutives (Banister et Hamilton, 1985; Halson, 2014). Le suivi de CE peut se faire à partir de marqueurs objectifs et/ou subjectifs (Borresen et Lambert, 2009). Dans les sports d'équipe, CE est complexe à appréhender car les périodes de compétitions sont longues, la fréquence des matchs est élevée et le nombre d'athlètes à gérer est important (Gabbett, 2016). La charge d'entraînement externe (CE_{ext}) peut être mesurée à l'aide de différentes techniques telles que le vidéo tracking (Sibila et al., 2004), la technologie GPS (Malone et al., 2015), l'accélérométrie ou plus simplement le temps passé à l'entraînement (Gorostiaga et al., 2006). Pour le monitoring de la charge d'entraînement interne (CE_{int}), certaines études se sont intéressées à des marqueurs physiologiques et/ou biologiques. $[T]_{sg}$ et $[C]_{sg}$ sont les marqueurs les plus fréquemment retrouvés dans la littérature (Fry et al., 1991). D'autres marqueurs biologiques ont été étudiés comme l'Hématocrite (H) dans le rugby (Banfi et al., 2006) ou la créatine kinase ($[CK]_{sg}$) et la Ferritine ($[F]_{sg}$) dans le football (Sanchis-Gomar et al., 2015). D'autres travaux réalisés en rugby, utilisant des marqueurs biologiques, se sont concen-

trés sur l'axe somatotrope avec les facteurs de croissance IGF-1 et IGF-3 (Elloumi et al., 2005). Parmi les marqueurs physiologiques, la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) est un outil de plus en plus utilisé dans le suivi de l'entraînement pour objectiver un état de forme physique ou un type de fatigue chez des triathlètes (Le Meur et al., 2013), des nageurs (Schmitt et al., 2016) ou des skieurs nordiques de niveau élite (Schmitt et al., 2015a). D'autres études ont tenté de monitorer CE_{int} à partir de marqueurs subjectifs comme le questionnaire de Hooper (Charlot et al., 2015) ou le RESTQ-Sport (Gonzalez-Boto et al., 2008). Certaines études ont tenté de trouver des relations entre les marqueurs objectifs (Cortisol et Testostérone) et subjectifs (questionnaire de surentrainement) pour définir l'état physique des athlètes (Crewther et al., 2009; Elloumi et al., 2008; Gaviglio et al., 2014). Ces études se sont centrées sur un ou deux marqueurs isolés, mais peu d'études se sont intéressées au monitoring de plusieurs types de marqueurs pendant toute une saison dans des sports d'équipe (Clarke et al., 2013; Dubois et al., 2017). Enfin, les effets d'une saison entière sur les caractéristiques physiques, biologiques et psychologiques de joueurs professionnels de handball restent relativement méconnus. A notre connaissance, seuls deux travaux (Bresciani et al., 2010; Gorostiaga et al., 2006) ont étudié une saison complète chez des joueurs masculins de handball. Gorostiaga et al. (2006), chez des joueurs de niveau élite, ont étudié les variations de performance physique en fonction du volume et de l'intensité de l'entraînement. Bresciani et al. (2010), chez des joueurs de niveau national, ont monitoré CE (à partir de la méthode sRPE) et CE_{int} en utilisant des marqueurs biologiques de l'inflammation (protéine C-réactive) et du stress oxydatif (glutathion réduit et oxydé) couplés à un questionnaire subjectif d'état d'humeur POMS et à REST-Q. Aucune de ces études n'a examiné la relation entre l'activité du joueur et les blessures. De plus, aucune étude n'a utilisé un ensemble de marqueurs subjectifs et objectifs, comme la VFC et le questionnaire Hooper, pour estimer CE_{int} de handballeurs élités sur l'ensemble d'une saison de compétition. Comprendre la relation dose-réponse permet d'optimiser le processus d'entraînement pour mieux prévenir les adaptations non fonctionnelles tout en permettant aux joueurs d'atteindre des performances élevées tout au long de la saison. Les études examinant cette relation sur toute une saison de compétition représentent une étape fondamentale pour mieux comprendre la prescription d'entraînement optimal pour les athlètes. Il devient, dès lors, important de multiplier les marqueurs dans le suivi longitudinal de joueurs de handball de classe mondiale. Par conséquent, les objectifs de notre étude étaient (i) de monitorer CE_{ext} à partir du temps consacré à l'entraînement spécifique handball, aux matchs, au développement de la force et de l'endurance, (ii) d'étudier les changements physiques biologiques, et psychologiques, et (iii) d'expliquer comment CE_{ext} influence les réponses physiques, biologiques et psychologiques des joueurs et le nombre de blessures musculaires au cours d'une saison. Notre hypothèse était que le temps passé à s'entraîner et à jouer pendant une saison de com-

pétition entraîne une modification des marqueurs de CE_{int} qui peut expliquer les baisses de forme ou les blessures chez des joueurs de handball de classe mondiale.

2.6.2 Organisation générale

Une étude longitudinale a été réalisée tout au long d'une saison de handball professionnel dans l'un des meilleurs championnats nationaux au monde. La saison de 47 semaines comprenait deux périodes de préparation pré-compétitive (Pc2P1 - semaines 1 à 8 et Pc2P2 - semaines 28 à 30), deux périodes de compétition (semaines 9 à 25 et semaines 31 à 47) et une période de repos (semaines 26 et 27). Tout au long de la saison, (i) le temps passé sur le terrain, à l'entraînement et dans les matchs, ainsi que le temps consacré au développement de la force et de l'endurance, étaient monitorés individuellement pour tous les joueurs et (ii) les joueurs étaient testés à plusieurs reprises (Figure 2.14). Pour les tests de terrain, les joueurs étaient testés à 5 reprises : le premier test (TT1) était effectué en semaine 1, le deuxième (TT2) en semaine 14, le troisième (TT3) en semaine 20, le quatrième (TT4) en semaine 33 et le cinquième test (TT5) en semaine 47. Les prélèvements sanguins étaient réalisés à 4 reprises : le premier (PS1) était effectué la semaine 1, le deuxième (PS2) la semaine 20, le troisième (PS3) la semaine 33 et le quatrième (PS4) la semaine 47. Les mesures de VFC étaient réalisées à 5 reprises : la première mesure (VFC1) était effectuée la semaine 1, la deuxième (VFC2) la semaine 9, la troisième (VFC3) la semaine 20, la quatrième (VFC4) la semaine 33, et la cinquième (VFC5) en semaine 47. Les mesures anthropométriques et le questionnaire de Hooper étaient réalisés toutes les semaines. Pour le questionnaire de Hooper, les mesures anthropométriques, les échantillons de sang et les tests VFC, les participants étaient évalués à la même heure de la journée entre 09:00 et 11:00 et les tests étaient toujours réalisés dans le même ordre : d'abord le test VFC, puis le questionnaire de Hooper, les mesures anthropométriques et enfin les prises de sang. Les tests de terrain étaient réalisés le premier jour d'entraînement de la semaine au club, entre 16:00 et 18:00 avant l'entraînement de préparation physique ou spécifique au handball. Pour ces tests, les sujets étaient familiarisés avec les protocoles d'évaluations, ayant déjà été testés à plusieurs reprises au cours des saisons précédentes. Une période de repos de 24 heures était respectée après la dernière séance d'entraînement ou de match afin d'éviter tout biais majeur. Les évaluations étaient toujours réalisées dans le même ordre, chaque sportif était d'abord soumis au test de détente verticale, puis au test de vitesse et enfin au test de VMA. Les sujets étaient fortement encouragés verbalement afin d'effectuer tous les tests du mieux qu'ils le pouvaient.

Plan du protocole expérimental

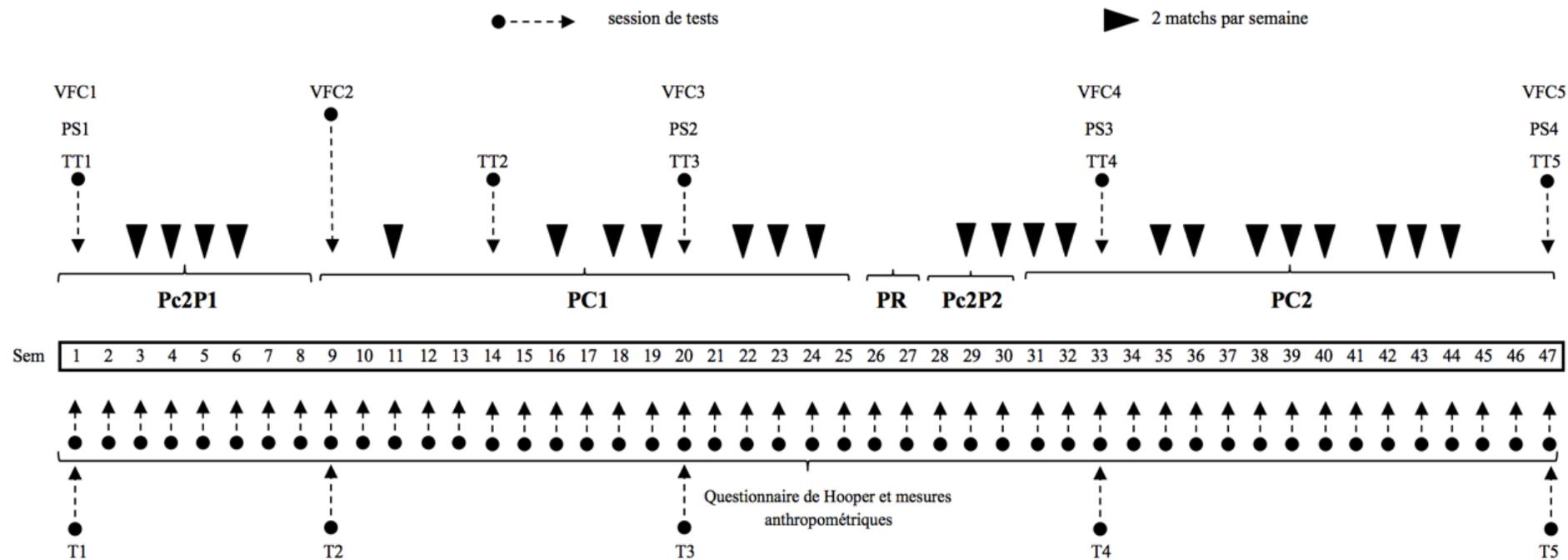


FIGURE 2.14 – Plan du protocole expérimental des études.

Pc2P1 : Préparation pré-compétitive 1; Pc2P2 : Préparation pré-compétitive 2; PC1 : Période compétitive 1; PC2 : Période compétitive 2; PR : Période de repos; TT1-TT5 : tests de terrain (SJ-CMJ-20m navette-5m DA); PS1-PS4 : Prélèvements sanguins; VFC1-VFC5 : Tests de variabilité de fréquence cardiaque; T1-T5 : sessions de tests pour les analyses statistiques.

Pendant la saison sportive, les joueurs s'entraînaient pour développer ou maintenir leurs qualités physiques, nécessaires à la pratique du handball de haut niveau. Différents objectifs étaient planifiés pour le développement de la force et de l'endurance en fonction du calendrier annuel de compétition (Tableau 2.7). La priorité était de maintenir un haut niveau de performance sur 47 semaines. Pour cela, un important travail physique autour du développement de la force et de l'endurance était mis en place pendant Pc2P. Par la suite, la fréquence des séances d'entraînement et des matchs limitait le travail physique. A partir de Pc2P (semaine 8) jusqu'à la fin de la première partie de la période de compétition (semaine 25), l'entraînement se concentrait principalement sur le développement de la puissance, de l'explosivité et de la capacité à répéter des sprints (RSA). La deuxième partie de la période de compétition est souvent synonyme de phases finales dans différentes compétitions (Coupe d'Europe, Coupe de France, Coupe de la Ligue, Championnat de France). Pour cela, les séances étaient programmées à partir du développement de la force maximale et de la puissance aérobie pour finir sur un travail d'explosivité et de RSA. L'entraînement de la force maximale était réalisé à environ 90% de 1-RM. La puissance était travaillée à des intensités de 50-60% de 1-RM et l'explosivité était développée à une intensité d'environ 30% de 1-RM, effectuée à vitesse maximale. Le développement de la capacité aérobie était réalisé à des intensités comprises entre 65 et 75% de VMA, tandis que la puissance aérobie était développée à une intensité comprise entre 100 et 110% de VMA. Enfin, la puissance anaérobie et les séances de sprints répétés étaient réalisées à intensité maximale (sprint).

TABLEAU 2.7 – Organisation annuelle des séances de force et d’endurance.

Programme annuel des entraînements															
Tests	T1			T2			T3			T4			T5		
Semaines	1-2	3-6	7-8	9-10	11-16	17-18	19-22	23-25	28-29	30-31	32-35	36-38	39-40	41-44	45-47
Entraînement en endurance	CA	PMA	PMA	RSA	PMA	PA	RSA	RSA	CA	PMA	PA	RSA	PMA	PA	RSA
	Fartlek 30-50min 65 - 80 % VMA	180-15sec 100% VMA r= 180-15 sec 2x 6-10 reps R= 3-5 min	30-5 sec 110% VMA r = 15 sec 2 x 5-6 reps R= 4 min	5 sec sprint r = 15 sec 2 x 6 reps R= 8 min	15 sec 110% VMA r = 15 sec 3 x 14 reps R= 4 min	30 sec sprint r = 4 min 2 x 5 reps R= 5 min	5 sec sprint r = 15 sec 2 x 6 reps R= 8 min	5 sec sprint r = 15 sec 2 x 6 reps R= 8 min	45 min 65 - 75% vma	15 sec 110% VMA r = 15 sec 3 x 14 reps R= 4 min	30 sec sprint r = 4 min 2 x 5 reps R= 5 min	5 sec sprint r = 15 sec 2 x 6 reps R= 8 min	15 sec 110% VMA r = 15 sec 3 x 14 reps R= 4 min	30 sec sprint r = 4 min 2 x 5 reps R= 5 min	5 sec sprint r = 15 sec 2 x 6 reps R= 8 min
Entraînement en force	Endurance force	Force max	Puissance	Explosivité	Puissance	Force max	Puissance	Explosivité	Hypertrophie	Force max	Puissance	Explosivité	Force max	Puissance	Explosivité
	4x 12-20 reps 40-60% 1-RM R= 1 min30 Squat SdT Rowing D. Couché D. Militaire	3x 4-8 reps 70-90% 1-RM R= 3-4 min Squat M. Banc Rowing D. Couché	3x 6-7 reps 50-60% 1-RM R= 2 min30 Squat M. Banc Snatch Pull-Over	3x 6 reps 30% 1-RM R= 3 min Squat SdT M.Banc D. Couché	3x 6-7 reps 50-60% 1-RM R= 2 min30 Squat M. Banc Pull-Over Snatch	3x 4 reps 90% 1-RM R= 3-4 min Squat SdT D. Couché	3x 6 reps 50% 1-RM R= 2 min30 Squat Snatch Pull-Over	3x 6 reps 30% 1-RM R= 3 min Squat SdT M. Banc Snatch Pull-Over	3x 6 reps 70% 1-RM R= 2 min Squat Press Rowing D. Militaire	12x 10 reps 70% 1-RM R= 2 min Squat Press Rowing D. Militaire	3x 4 reps 90% 1-RM R= 4 min Squat SdT D. Couché Clean	3x 6 reps 50% 1-RM R= 3 min Squat SdT M. Banc Snatch Pull-Over	3x 6 reps 30% 1-RM R= 3 min Squat SdT M.Banc D. Couchés	3x 4 reps 90% 1-RM R= 4 min Squat SdT Push-Press Rowing	3x 6 reps 50% 1-RM R= 3 min Squat SdT M. Banc Snatch Clean

T1-T5 : sessions de tests 1-5 pour les analyses statistiques.

CA : capacité aérobie; PMA : puissance maximale aérobie; PA : puissance anaérobie; RSA : aptitude à répéter des sprints;

VMA : vitesse maximale aérobie; R : récupération inter series; r : récupération inter répétitions.

2.6.2.1 Analyse des données d'entraînement et de compétition pendant toute la saison

Au cours de la saison, les entraîneurs monitoraient le temps d'entraînement et les matchs de manière individuelle (c.-à-d. la participation des joueurs à chaque séance d'entraînement et de compétition, y compris la durée de chaque activité). Le volume d'entraînement individuel était déterminé en fonction de la durée de participation de chaque joueur à chaque activité. Le suivi comprenait un inventaire du nombre et de la nature des séances d'entraînement (Figure 2.15) effectuées par tous les joueurs au cours des différentes périodes de la saison. De plus, le monitoring comprenait un suivi (en minutes) de l'entraînement et du temps de match.

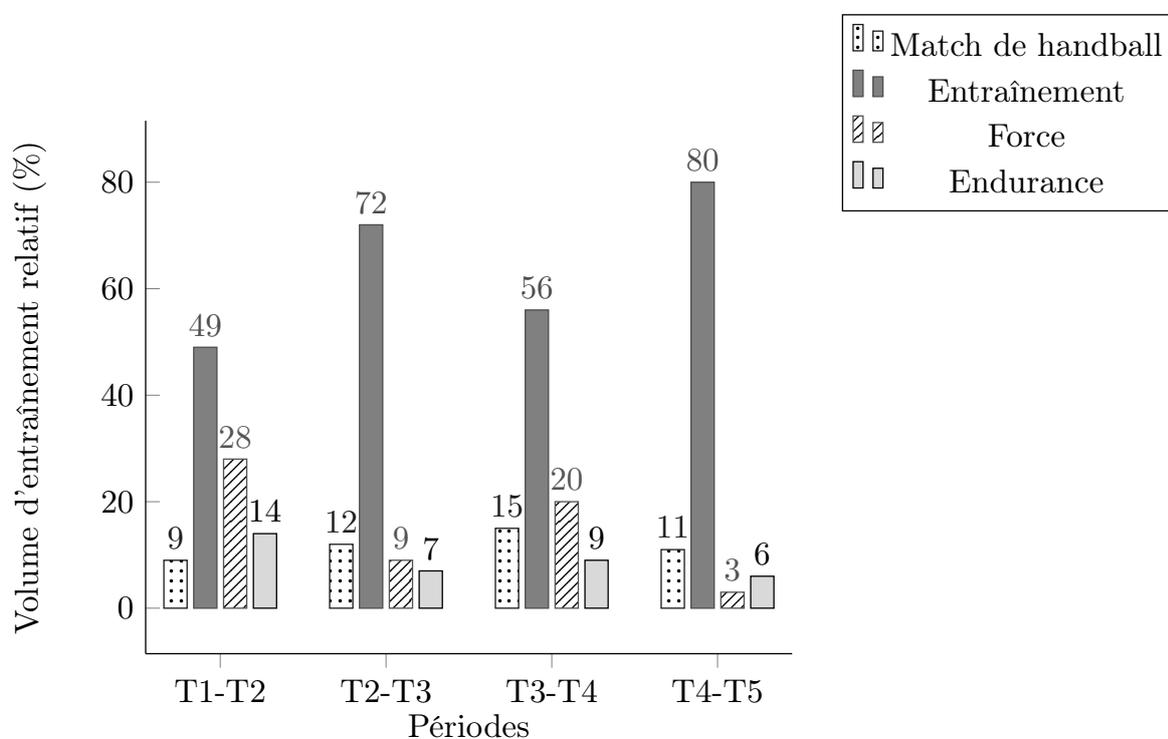


FIGURE 2.15 – Volume d'entraînement relatif.

T1-T5 : sessions de tests 1-5 pour les analyses statistiques.

2.6.2.2 Paramètres physiques

Les évaluations comprenaient des tests de détente verticale (SJ et CMJ), un test de vitesse de course sur 5 m départ arrêté (5m DA) et un test de VMA (navette 20m). Afin de minimiser les risques de blessures, les joueurs suivaient un protocole d'échauffement standardisé qui comprenait 10 min de course à une allure de footing, des gammes athlétiques de course, des étirements actifs dynamiques et des sprints progressifs.

Tests de détente verticale

Pour effectuer ces tests, nous avons utilisé un Optojump (Optojump next, Microgate, Bolzano, Italie). Le protocole des tests de détente était standardisé et les joueurs étaient familiarisés avec ce protocole. Pour SJ, les joueurs, lorsqu'ils étaient prêts, descendaient jusqu'à une angulation des genoux de 90° (contrôlé avec un goniomètre). A cette angulation, ils marquaient un temps d'arrêt et réalisaient un saut vertical aussi haut que possible sans contre mouvement au démarrage (Young et al., 1997). Ils devaient atterrir avec les deux pieds en même temps, sans flexion de hanche pendant la suspension et sans fléchir les genoux avant l'atterrissage. Pour CMJ, à partir de la position debout, les joueurs, lorsqu'ils étaient prêts, effectuaient un contre mouvement pour arriver à une flexion des genoux à 90° suivit d'une triple extension pour sauter le plus haut possible (Young et al., 1997). Les joueurs devaient garder leurs mains sur les hanches tout au long du mouvement afin de ne pas s'aider par l'allègement des membres supérieurs (Figure 2.16). Ces tests étaient réalisés pour mesurer la hauteur de saut avec une précision de 10^{-3} secondes pour les temps de vol et le temps de contact au sol (Bosco et Komi, 1979). Les joueurs réalisaient 3 répétitions par test avec 10 secondes de repos entre les sauts et 45 secondes de repos entre SJ et CMJ. La meilleure performance était retenue.



FIGURE 2.16 – Passage d'un test de détente verticale.

Test de vitesse de démarrage

Pour ce test, nous avons utilisé des cellules photoélectriques de la marque Brower (Brower Timing Systems, Draper, Utah, USA. Figure 2.17). Avant le test, les joueurs étaient familiarisés avec le protocole. Le test s'est déroulé dans le gymnase d'entraînement habituel. Les joueurs étaient immobiles, les pieds derrière la ligne de départ (sans toucher la ligne

avec les pieds) avec un pied devant l'autre (le pied de départ préférentiel était le même pendant tous les tests). Quand il était prêt, le joueur sprintait le plus vite possible sur la distance. Chaque joueur réalisait 3 essais avec une minute de récupération entre les essais. La meilleure performance était retenue. Ce test évalue la capacité d'accélération du joueur sur 5 mètres.



FIGURE 2.17 – Cellules photoélectriques (Brower) utilisées pour le test de 5m départ arrêté.

Tests de vitesse maximale aérobie (VMA)

Le test navette de [Leger et Lambert \(1982\)](#) était utilisé au cours de cette étude. Il reflète idéalement les nombreux changements de direction rencontrés dans l'activité du joueur de handball. De plus, ce test se réalise dans un gymnase, ce qui protège des conditions météorologiques. Tous les joueurs réalisaient ce test jusqu'à épuisement. Lors de ce test, les joueurs étaient encouragés verbalement afin qu'ils courent le plus longtemps possible. Le joueur était considéré comme épuisé s'il s'arrêtait de lui même (malgré les encouragements appuyés) ou alors parce qu'il ne pouvait plus maintenir la vitesse imposée. Avant le début du test les joueurs étaient familiarisés (à l'aide de démonstrations précises) avec le protocole du test. Au cours de ce test les joueurs devaient enchaîner des navettes entre 2 lignes placées à 20 mètres de distance l'une de l'autre. La vitesse de course était incrémentée de 0.5 km.h^{-1} toutes les minutes. Elle était dictée par des signaux audio à partir d'un magnétophone. L'objectif du test était de réaliser autant d'aller-retour que possible. Le joueur était arrêté lorsque, sur 3 intervalles successifs, il accusait un retard de plus d'un mètre sur une ligne d'aller-retour. La VMA était considérée comme la vitesse au dernier complété. Si le dernier palier n'était pas complet, la VMA retenue était la vitesse au dernier palier complet effectué. FC était enregistrée en continue du début à la fin de chaque test (échauffement et récupération compris) (Polar Electro, Kempele, Finland). Le système de cardiofréquencemètre à doubles électrodes était composé d'une ceinture et d'un boîtier récepteur placés sur le sujet à chaque début de test (Figure 2.6).

Mesures anthropométriques

La masse corporelle des joueurs était mesurée le matin à jeun en arrivant au club. Le test était réalisé en tenue légère et sans chaussures, en utilisant une balance Tanita TBF- 3000 (Tanita Corporation, Tokyo, Japon). Le pourcentage de masse grasse était estimé à partir

de quatre plis cutanés (bicipital, tricipital, sous-scapulaire et supra-iliaque) (Figure 2.7). La méthode utilisée était celle de [Durnin et Rahaman \(1967\)](#). Les plis étaient mesurés à l'aide d'une pince à plis cutanés Harpenden (Harpenden, inc). La masse maigre (FFM) correspondait à la différence entre la masse corporelle mesurée et la masse grasse estimée.

2.6.2.3 Paramètres biologiques

Les prélèvements sanguins étaient effectués le matin au club, à jeun. Les examens hématologiques étaient effectués par hémogramme afin de déterminer la nature des cellules présentes dans le sang et de les quantifier à l'aide d'un système automatisé. La concentration de H était déterminée par une méthode immunoenzymatique à l'aide d'un système automatisé (Horiba Pentra DX 120, Horiba ABX, Montpellier, France). Les examens biochimiques comprenaient un dosage de CPK et de $[F]_{sg}$ réalisé par la méthode réflectométrique V 5600 Ortho Clinical Diagnostic (LRBM, Montpellier, France). L'analyse des concentrations hormonales comprenait les dosages de $[C]_{sg}$, $[T]_{sg}$, IGF-1 et IGFBP-3. $[C]_{sg}$ et $[T]_{sg}$ étaient dosés par électrochimiluminescence, IGF-1 par chimiluminescence et IGFBP-3 par ELISA (Biomnis, Lyon, France).

2.6.2.4 Paramètres psychologiques

Le questionnaire Hooper ([Hooper et al., 1995](#)) était utilisé au cours de cette étude. Il s'agit d'un questionnaire en 4 items qui est utilisé pour estimer les niveaux de fatigue, de douleur et de stress ainsi que la qualité du sommeil. Chaque semaine, le premier jour du retour au club, les joueurs remplissaient le questionnaire. Ils attribuaient une note de 1 (sentiment très positif) à 7 (sentiment le plus négatif) pour chacun des items présentés ci-dessus.

2.6.2.5 Paramètres de variabilité de la fréquence cardiaque

Les données de VFC étaient enregistrées le matin, avant le petit-déjeuner et après une période de 2-3 min de calme, allongé sur le sol. Ce test reposait sur 15 min d'enregistrement de la FC au repos à partir de l'intervalle RR, avec 8 min en décubitus dorsal (couché) suivi de 7 min en position debout ([Schmitt et al., 2013](#)). Les analyses de VFC étaient réalisés entre la 3^e et la 8^e min en décubitus dorsal et entre la 9^e et la 14^e min en position debout. Les mesures de l'activité électrique cardiaque à partir de la durée de l'intervalle entre deux ondes R étaient réalisées à l'aide d'un moniteur de FC (Polar Team 2, Polar Electro, Oy, Kempele, Finlande) ([Schmitt et al., 2015a](#)). La puissance spectrale était calculée par une transformation de Fourier rapide (FFT) grâce à un logiciel spécifique (Kubios®, Kuopio, Finlande). La puissance spectrale était exprimée en ms^2 ([Task Force, 1996](#))

avec une bande de HF (0.15-0.40Hz), reflétant la modulation de l'influence parasympathique sur le cœur et liée à l'arythmie sinusale (Pomeranz et al., 1985) et une bande de LF (0.04-0.15 Hz) reflétant principalement la modulation de l'influence sympathique sur le cœur. Pendant les évaluations, la fréquence respiratoire était enregistrée pour chaque sujet. En effet, un cycle très bas inférieur à 9 cycles par minute, pourrait décaler les basses fréquences à 0.15 Hz et ainsi diminuer la bande des HF ou augmenter celles des LF. Les paramètres retenus et analysés lors des mesures couchées et debout étaient : LF, HF, LF+HF, FC, la racine carrée de la différence au carrée des intervalles R-R (RMSSD) ainsi que l'énergie totale.

2.6.2.6 Distribution des blessures

Le personnel médical du club était chargé d'identifier et de documenter l'occurrence et la gravité des blessures. Les blessures d'une gravité inférieure à 3 jours étaient exclues des analyses. Une blessure était définie comme toute douleur ou incapacité ressentie par un joueur sur le membre inférieur ou supérieur pendant ou après un match ou un entraînement, l'empêchant de s'entraîner ou de jouer normalement pendant plus de trois jours. Comme le montre la figure 2.18, les blessures étaient quantifiées mensuellement en fonction du nombre total de blessures et du nombre de joueurs blessés pendant toute la saison.

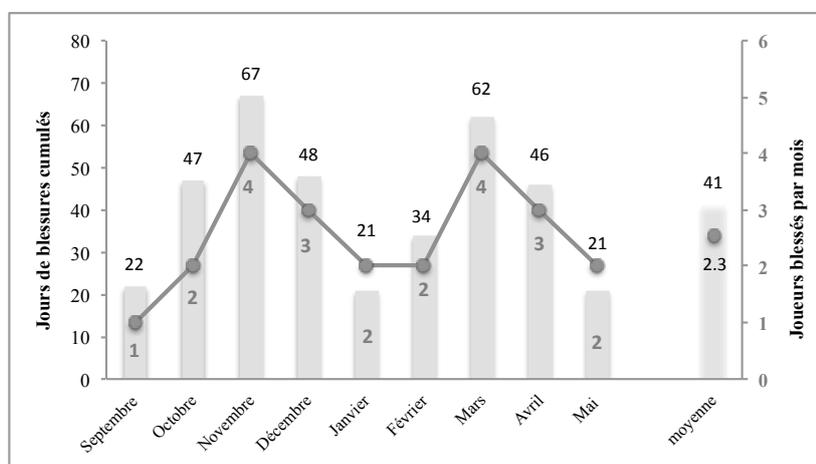


FIGURE 2.18 – Evolution du nombre de jours cumulés de blessures et du nombre de joueurs blessés durant toute la saison.

2.6.2.7 Analyses statistiques

Plus de 13928.8 ± 1543.1 min d'entraînement en moyenne et par joueur, comprenant le temps moyen d'entraînement de handball et de match par joueur (10804.6 ± 1468.6 min), le temps moyen consacré à l'entraînement de la force (1894.2 ± 140.7 min) et de l'endurance avec ou sans ballon (1230 ± 0 min) ont été analysés tout au long des 47 semaines de

la saison sportive. Au total, 65 tests aérobie, 611 questionnaires Hopper, 52 prélèvements sanguins, 65 tests VFC, 390 mesures de détente verticale (SJ et CMJ) et 156 données anthropométriques ont été obtenues et analysées. Les analyses statistiques de l'évolution de ces précédents paramètres au cours de la saison étaient réalisées entre T1, T2, T3, T4 et T5 pour VFC, les caractéristiques anthropométriques et le temps passé à s'entraîner et jouer et entre T1, T3, T4 et T5 pour les prélèvements sanguins. T1 et T2 étaient respectivement situés au début et à la fin de Pc2P et T5 était situé à la fin de la saison. T3 et T4 étaient localisés respectivement en décembre (4 semaines avant la fin de CP1) et en mars (3 semaines après le début de CP2). Enfin, les analyses statistiques de l'évolution des tests de terrain, au cours de la saison, étaient effectuées entre FT1, FT2, FT3, FT4 et FT5. FT1, FT3, FT4 et FT5 étaient situés aux mêmes endroits que T1, T3, T4 et T5. FT2 était situé 5 semaines après le début de CP1. Les données sont présentées sous forme de moyenne \pm l'erreur standard de la moyenne (SEM). Après avoir effectué un test de normalité par le test de Kolmogorov-Smirnov (avec corrections Lilliefors), les valeurs des variables dépendantes (dosages sanguins, tests de terrain, tests de VFC et questionnaire Hooper) étaient comparées en utilisant une ANOVA à mesures répétées à une voie. Toutes les analyses statistiques étaient réalisées avec le logiciel SigmaStat et toutes les représentations de figures étaient réalisées avec SigmaPlot (version 9.0, SYSTAT, USA). Le niveau de significativité pour tous les tests statistiques était fixé à $p \leq 0.05$. La régression linéaire avec les coefficients de Pearson (r) était utilisée pour établir les relations potentielles entre les changements dans les prélèvements sanguins, les tests de VFC, les tests de terrain et le temps passé à l'entraînement et au match. Les coefficients de corrélation étaient présentés avec un intervalle de confiance à 95 % (IC à 95 %). L'ampleur de la corrélation (r) était évaluée comme suit : $r < 0.1$, trivial; $> 0.1-0.3$, petit; $> 0.3-0.5$, modéré, $0.5-0.7$, grand; $> 0.7-0.9$, très grand; $> 0.9-0.99$, presque parfait et 1.0 , parfait (Hopkins et al., 2009).

2.6.3 Resultats préliminaires

2.6.3.1 Caractéristiques de l'entraînement

Les caractéristiques de l'entraînement au cours de la saison sont présentées dans le tableau 2.8. Nos résultats montrent que les valeurs moyennes d'entraînement au handball par semaine sont significativement plus élevées ($p < 0.05$) à T4-T5 par rapport à T1-T2, T2-T3 et T3-T4 alors que les valeurs moyennes à T1-T2 et T2-T3 sont significativement plus élevées ($p < 0.05$) par rapport à T3-T4.

TABLEAU 2.8 – Valeurs moyennes (\pm SEM) des caractéristiques de l'entraînement au cours de la saison.

	T1-T2	T2-T3	T3-T4	T4-T5
Durée (semaines)	8	11	13	15
Nombre de sessions d'entraînement de handball	46	48	55	77
Moyennes des sessions d'entraînement de handball par semaine	5.8	4.4	4.2	5.1
Moyenne du temps de handball (min)	1741.3 \pm 131.8	2771.9 \pm 172.1	1922.0 \pm 236.5	4301.7 \pm 108.4
Moyenne du temps de handball par semaine (min)	217.7	252.0	147.8	286.8 ^(1,2,3)
Moyenne du temps d'entraînement en force (min)	844.2 \pm 39.0	300 \pm 0	600 \pm 0	150 \pm 0
Moyenne du temps d'entraînement en endurance (min)	420 \pm 0	240 \pm 0	280 \pm 0	290 \pm 0
Nombre de sessions d'entraînement physique	34	17	25	18
Nombre de matchs	8	19	20	21

1 : Significativement différent de T1-T2

2 : Significativement différent de T2-T3

3 : Significativement différent de T3-T4

$p < 0.05$

2.6.3.2 Caractéristiques anthropométriques

Aucune différence significative n'a été observée au cours de la saison concernant la masse corporelle de nos sujets alors que la masse grasse est significativement ($p < 0.05$) plus faible en T2, T3, T4 et T5 par rapport à T1 (Tableau 2.9).

TABLEAU 2.9 – Valeurs moyennes (\pm SEM) des caractéristiques anthropométriques au cours de la saison.

	T1	T2	T3	T4	T5
Masse (kg)	96.08 \pm 3.65	95.59 \pm 3.45	96.25 \pm 3.42	95.71 \pm 3.07	95.70 \pm 3.08
Masse grasse (%)	12.20 \pm 0.72 ^(2,3,4,5)	11.01 \pm 0.74	10.43 \pm 0.60	10.68 \pm 0.60	10.35 \pm 0.59

2 : Significativement différent de T2

3 : Significativement différent de T3

4 : Significativement différent de T4

5 : Significativement différent de T5

$p < 0.05$

T1-T5 : sessions de tests pour les analyses statistiques.

2.6.3.3 Paramètres physiques

Nos résultats (Tableau 2.10) montrent que VMA, SJ et CMJ sont significativement ($p < 0.05$) plus élevés à TT2, TT3, TT4 et TT5 par rapport à TT1 alors que 5m DA est significativement ($p < 0.05$) plus faible à TT2, TT3, TT4 et TT5 par rapport à TT1.

TABLEAU 2.10 – Valeurs moyennes (\pm SEM) pour les paramètres physiques au cours de la saison.

	TT1	TT2	TT3	TT4	TT5
VMA ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	13.70 \pm 0.10	13.87 \pm 0.11 ⁽¹⁾	13.88 \pm 0.11 ⁽¹⁾	14.02 \pm 0.11 ⁽¹⁾	13.91 \pm 0.14 ⁽¹⁾
SJ (cm)	37.60 \pm 1.47	38.79 \pm 1.47 ⁽¹⁾	39.00 \pm 1.48 ⁽¹⁾	39.48 \pm 1.60 ⁽¹⁾	39.92 \pm 1.57 ⁽¹⁾
CMJ (cm)	39.05 \pm 1.56	41.06 \pm 1.58 ⁽¹⁾	41.45 \pm 1.77 ⁽¹⁾	42.32 \pm 1.80 ⁽¹⁾	42.25 \pm 1.69 ⁽¹⁾
5m DA (s)	1.000 \pm 0.009	0.990 \pm 0.009 ⁽¹⁾	0.980 \pm 0.006 ⁽¹⁾	0.980 \pm 0.008 ⁽¹⁾	0.980 \pm 0.007 ⁽¹⁾

1 : Significativement différent de T1

p < 0.05

TT1-TT5 : sessions de tests terrains pour les analyses statistiques.

2.6.3.4 Paramètres biologiques

Nos résultats (Tableau 2.11) montrent que l'Hématocrite est significativement ($p < 0.05$) plus faible à T4 par rapport à T1, T3 et T5 et que la Ferritine est significativement ($p < 0.05$) plus faible (i) à T5 par rapport à T1, T3 et T4 et (ii) à T4 par rapport à T1. Nos résultats montrent également que le Cortisol est significativement ($p < 0.05$) plus faible à T5 par rapport à T1, T3 et T4 alors que la Testostérone est significativement ($p < 0.05$) plus élevée (i) à T5 par rapport à T1, T3, T4 et (ii) à T4 par rapport à T3 et (iii) à T1 par rapport à T3. Enfin, l'IIGF-1 est significativement ($p < 0.05$) plus faible (i) à T5 par rapport à T1, T3, T4 et (ii) à T4 et T3 par rapport à T1. Aucune autre différence significative n'a été observée pour les valeurs moyennes de IGFBP-3 et de CPK. Nos résultats montrent également que l'hématocrite est significativement corrélée avec VMA ($R = 0.38$, $p < 0.01$) et qu'il existe une corrélation significative entre la Ferritine et VMA ($R = 0.36$, $p < 0.01$), SJ ($R = 0.44$, $p < 0.001$) et CMJ ($R = 0.33$, $p < 0.01$). Enfin, IGF-1 est significativement corrélé avec SJ ($R = 0.44$, $p < 0.001$) et CMJ ($R = 0.34$, $p < 0.01$).

TABLEAU 2.11 – Valeurs moyennes (\pm SEM) des paramètres biologiques durant la saison.

	T1	T3	T4	T5
Hématocrite (%)	46.72 \pm 0.61 ⁽⁴⁾	45.42 \pm 0.54 ⁽⁴⁾	44.79 \pm 0.53	45.98 \pm 0.58 ⁽⁴⁾
CPK (UI/L)	214.15 \pm 38.91	231.38 \pm 64.20	224.46 \pm 35.00	217.54 \pm 42.26
Ferritine (ng/mL)	107.31 \pm 11.42 ^(4,5)	108.85 \pm 15.35 ⁽⁵⁾	107.31 \pm 14.12 ⁽⁵⁾	96.69 \pm 11.18
Cortisol (nmol/L)	537.54 \pm 19.25 ⁽⁵⁾	526.54 \pm 26.93 ⁽⁵⁾	516.31 \pm 24.83 ⁽⁵⁾	482.39 \pm 29.67
IGFBP-3 (ng/mL)	2313.92 \pm 61.00	2618.69 \pm 84.12	2620.92 \pm 182.07	2801.92 \pm 293.69
Testostérone (nmol/L)	20.97 \pm 1.00 ⁽³⁾	19.61 \pm 1.06	22.11 \pm 1.15 ⁽³⁾	24.86 \pm 1.35 ^(1,3,4)
IGF-1 (μg)	217.68 \pm 8.88 ^(3,4,5)	201.38 \pm 10.17 ⁽⁵⁾	198.25 \pm 9.04 ⁽⁵⁾	189.54 \pm 9.27

1 : Significativement différent de T1

3 : Significativement différent de T3

4 : Significativement différent de T4

5 : Significativement différent de T5

p < 0.05

T1-T5 : sessions de tests pour les analyses statistiques.

2.6.3.5 Paramètres psychologiques

Le tableau 2.12 montre la cinétique des résultats des tests de Hopper mesurés à T1, T2, T3, T4 et T5. Nos résultats (Tableau 2.12) montrent que les scores de fatigue, de sommeil

et de stress sont significativement ($p < 0.05$) plus élevés (i) à T4 par rapport à T1, T2, T3, T5 et (ii) à T3 et T5 par rapport à T1. Nos résultats montrent également que le score de stress est significativement ($p < 0.05$) plus élevé (i) à T2 et T5 par rapport à T1 et (ii) à T3 par rapport à T2 et T5. Enfin, nos résultats montrent que les scores de fatigue et de sommeil sont significativement ($p < 0.05$) plus élevés à T2 par rapport à T1, T3 et T5. En ce qui concerne le score de douleur, toutes les valeurs moyennes sont significativement différentes. La figure 2.19 montre la cinétique des scores Hooper mesurés chaque semaine tout au long de la saison. Ces résultats montrent deux augmentations très importantes des scores entre T1 et T2 et entre T2 et T3. Les valeurs maximales observées à semaine 4 (24.7 ± 1.0) entre T1 et T2 et les semaines 12 (22.4 ± 1.7), 13 (22.8 ± 1.2) et 14 (22.6 ± 1.26) entre T2 et T3, sont significativement ($p < 0.05$) plus élevées que les scores mesurés à T2 (14.8 ± 1.4) et T3 (12.3 ± 1.0) respectivement. Enfin, nos résultats montrent une augmentation relativement progressive des scores entre T3 et T4 ainsi qu'une diminution relativement progressive des scores entre T4 et T5. Dans ce cadre, les scores Hooper à T4 (semaine 33) étaient les scores les plus élevés observés entre T3 (semaine 20) et T5 (semaine 47).

TABLEAU 2.12 – Valeurs moyennes (\pm SEM) des paramètres psychologiques durant la saison.

	T1	T2	T3	T4	T5
Fatigue (UA)	1.38 ± 0.14	$3.54 \pm 0.14^{(1,3,5)}$	$2.77 \pm 0.12^{(1)}$	$5.92 \pm 0.21^{(1,2,3,5)}$	$2.76 \pm 0.17^{(1)}$
Sommeil (UA)	1.54 ± 0.14	$4.30 \pm 0.13^{(1,3,5)}$	$3.38 \pm 0.18^{(1)}$	$5.61 \pm 0.14^{(1,2,3,5)}$	$2.85 \pm 0.19^{(1)}$
Stress (UA)	1.46 ± 0.14	$2.61 \pm 0.14^{(1)}$	$3.61 \pm 0.14^{(1,2,5)}$	$6.00 \pm 0.20^{(1,2,3,5)}$	$2.77 \pm 0.12^{(1)}$
Douleur (UA)	$1.54 \pm 0.14^*$	$2.54 \pm 0.14^*$	$3.54 \pm 0.21^*$	$5.92 \pm 0.21^*$	$3.00 \pm 0.23^*$
Total (UA)	5.92 ± 1.19	14.76 ± 1.36	14.00 ± 1.35	23.46 ± 1.85	11.38 ± 1.45

1 : Significativement différent de T1

2 : Significativement différent de T2

3 : Significativement différent de T3

5 : Significativement différent de T5

* : Tout est significativement différent

$p < 0.05$

T1-T5 : sessions de tests pour les analyses statistiques.

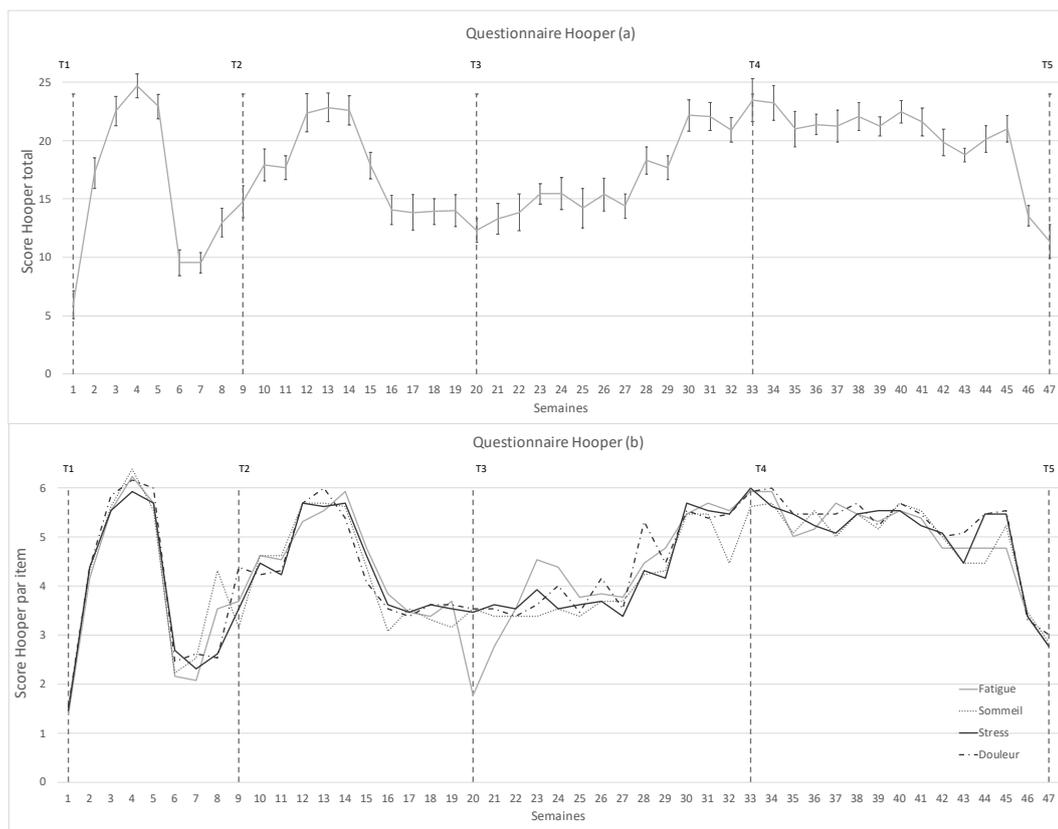


FIGURE 2.19 – Evolution du score de Hooper durant toute la saison.

a : Evolution du score total de Hooper ; b : Evolution des 4 items du score de Hooper.

T1-T5 : sessions de tests pour les analyse statistique.

2.6.3.6 Description des réponses de variabilité de la fréquence cardiaque

En position couchée sur le dos (Tableau 2.13), nos résultats montrent que FC est significativement ($p < 0.05$) plus élevée à T1 et T5 par rapport à T2, T3 et T4 et que HF et TP sont significativement ($p < 0.05$) plus élevés à T3 par rapport à T1, T2, T4 et T5. Nos résultats montrent également que LF + HF sont significativement ($p < 0.05$) plus élevés (i) à T3 par rapport à T1, T2, T4, (ii) à T5 par rapport à T1 et T2 et (iii) à T4 par rapport à T5. Aucune autre différence significative n'a été observée pour LF.

En position debout (Tableau 2.13), nos résultats montrent que FC est significativement ($p < 0.05$) plus élevée à T1 par rapport à T2, T3, T4 et T5. Ils montrent également que LF est significativement ($p < 0.05$) plus élevée (i) à T3 par rapport à T1, T2, T4, T5 et (ii) à T1 par rapport à T2 et T4 et (iii) à T5 par rapport à T1. HF est significativement ($p < 0.05$) plus faible à T1 par rapport à T2, T3, T4 et T5 alors que LF + HF sont significativement ($p < 0.05$) plus élevés (i) à T3 par rapport à T1, T2, T4 et T5 et (ii) à T1 par rapport à T2 et (iii) à T4 et T5 par rapport à T1. Enfin, les valeurs moyennes de TP sont significativement plus élevées (i) à T3 par rapport à T1, T2, T5 et (ii) à T4 par rapport à T3 et (iii) à T1 par rapport à T2 et T5 et (iv) à T4 par rapport à T1.

TABLEAU 2.13 – Valeurs moyennes (\pm SEM) pour les paramètres de variabilité de fréquence cardiaque au cours de la saison.

	T1	T2	T3	T4	T5
Supine					
HR (bpm)	57.56 \pm 1.70 ^(2,3,4)	53.15 \pm 1.73	53.26 \pm 1.71	54.57 \pm 1.93	57.11 \pm 1.52 ^(2,3,4)
RMSSD (ms)	66.67 \pm 10.81	73.05 \pm 11.82	78.52 \pm 11.27	68.16 \pm 11.18	52.41 \pm 6.88
LF (ms ²)	1466.08 \pm 333.39	1383.23 \pm 335.09	1471.77 \pm 236.47	1678.92 \pm 515.80	1539.00 \pm 199.77
HF (ms ²)	1470.85 \pm 395.10	1840.00 \pm 405.33	2512.77 \pm 299.63 ^(1,2,4,5)	1871.85 \pm 404.28	2002.00 \pm 341.84
LF+HF (ms ²)	2936.92 \pm 695.13	3223.23 \pm 567.36	3984.54 \pm 426.24 ^(1,2,4)	3550.77 \pm 831.77	3541.00 \pm 486.50 ^(1,2,4)
TP (ms ²)	6065.92 \pm 1907.27	5229.85 \pm 778.29	6341.46 \pm 674.71 ^(1,2,4,5)	5275.61 \pm 1135.19	5526.69 \pm 625.05
Standing					
HR (bpm)	83.73 \pm 3.48 ^(2,3,4,5)	76.41 \pm 3.08	74.18 \pm 2.53	79.98 \pm 4.74	77.09 \pm 2.94
RMSSD (ms)	22.46 \pm 5.28	29.01 \pm 4.35	32.97 \pm 4.99	33.72 \pm 5.20	27.84 \pm 3.75
LF (ms ²)	2272.00 \pm 1223.08	2224.15 \pm 436.97 ⁽¹⁾	2915.38 \pm 423.53 ^(1,2,4,5)	2234.54 \pm 489.86 ⁽¹⁾	2285.92 \pm 453.99 ⁽¹⁾
HF (ms ²)	314.31 \pm 169.43	334.85 \pm 80.87 ⁽¹⁾	434.00 \pm 65.23 ⁽¹⁾	417.07 \pm 108.24 ⁽¹⁾	314.77 \pm 54.99 ⁽¹⁾
LF+HF (ms ²)	2596.30 \pm 1391.68	2559.00 \pm 506.48 ⁽¹⁾	3349.38 \pm 482.46 ^(1,2,4,5)	2651.61 \pm 556.87 ⁽¹⁾	2600.69 \pm 461.35 ⁽¹⁾
TP (ms ²)	6004.08 \pm 3820.88	5068.00 \pm 1035.83 ⁽¹⁾	6277.85 \pm 1073.69 ^(1,2,4,5)	6469.92 \pm 1333.20 ⁽¹⁾	5069.08 \pm 971.84 ⁽¹⁾

1 : Significativement différent de T1

2 : Significativement différent de T2

3 : Significativement différent de T3

4 : Significativement différent de T4

5 : Significativement différent de T5

$p < 0.05$

T1-T5 : sessions de tests pour les analyses statistiques.

2.6.4 Discussion des résultats préliminaires

Le but de ce travail était d'étudier l'évolution de paramètres physiques, biologiques et psychologiques chez des joueurs de handball de très haut niveau et sur l'ensemble d'une saison sportive. Notre protocole expérimental était constitué de 47 semaines d'entraînement et de compétition, scindées en quatre périodes (T1-T2, T2-T3, T3-T4 et T4-T5). Nos

résultats montrent que les valeurs moyennes de temps d'entraînement en handball exprimées en minute et par semaine sont significativement ($p < 0.05$) plus élevées à T4-T5 par rapport à T1-T2, T2-T3 et T3-T4. Ils montrent également que ces valeurs moyennes sont significativement ($p < 0.05$) plus élevées à T1-T2 et T2-T3 par rapport à T3-T4. La première période (T1-T2, Pc2P) est une période cruciale pour préparer les joueurs à la saison de compétition (Maurelli et al., 2017; Murray et al., 2016). La part relative de la pratique spécifique handball (entraînements et matchs) au cours de cette période représentait 58% du temps total d'entraînement, tandis que l'entraînement physique (force et endurance) représentait 42% de ce temps total. Cette répartition changeait dès lors que la période de compétition (PC1) commençait, avec une part relative dédiée à l'entraînement physique qui se réduisait à respectivement 16% pour T2-T3, 29% pour T3-T4 et 9% pour T4-T5 (Figure 2.15). Cette réduction très importante du temps d'entraînement consacré au développement des qualités physiques peut s'expliquer par les contraintes importantes (fréquence des matchs, temps de récupération, nombreux déplacements en France et à l'étranger...) associées aux deux phases de compétition (PC1 et PC2 – Figure 2.14), qui laissent peu de place pour les séances dédiées au développement des qualités physiques. Cette réduction s'accroissait pour T4-T5, période pendant laquelle se déroulaient les compétitions les plus importantes de la saison et où la priorité du travail était ciblée sur les aspects techniques et tactiques en handball. Seule la période T3-T4 permettait de réintégrer une part non négligeable de travail physique (Pc2P2).

La tendance générale des résultats de notre étude montre que les effets de 47 semaines d'entraînement et de compétition varient selon les périodes de l'année. Concernant la composition corporelle, qui est un bon indicateur des variations de performances du sportif (Dubois et al., 2017), les valeurs moyennes de la masse corporelle totale et de la masse grasse de notre étude sont similaires à celles de Thorlund et al. (2008) et Chaouachi et al. (2009) pour des niveaux de compétition identiques. Nos résultats montrent que la masse corporelle totale ne change pas significativement sur l'ensemble de la saison. En revanche, le pourcentage de masse grasse est significativement ($p < 0.05$) plus faible à T2, T3, T4 et T5 par rapport à T1. Ces résultats indiquent donc indirectement une augmentation de la masse maigre au cours de Pc2P. La diminution du pourcentage de masse grasse au cours de Pc2P peut s'expliquer par les valeurs élevées de ce paramètre au début de cette période. Ces valeurs élevées sont probablement liées aux 5 semaines de vacances qui précédaient Pc2P. Ormsbee et Arciero (2012) montrent, en effet, chez des nageurs collégiens élités, une augmentation de la masse grasse après 5 semaines d'inactivité physique totale. La diminution du pourcentage de masse grasse au cours de Pc2P est également en accord avec la littérature. Pour Gorostiaga et al. (2006), la période de préparation physique de début de saison permet de retrouver les valeurs de composition corporelle concomitantes de la période de compétition (Gorostiaga et al., 2006). De plus, Argus et al. (2010), chez

des joueurs de rugby professionnels, montrent une baisse de 9.5 ± 2.8 % des valeurs de masse grasse entre le début et la fin de la période de préparation de 4 semaines (13.7 ± 4.8 % vs 12.3 ± 4.1 %). L'augmentation de la masse maigre pendant Pc2P est probablement liée à une augmentation de la masse musculaire liée à la charge d'entraînement importante proposée pendant Pc2P. [Gorostiaga et al. \(2006\)](#) ont en effet montré, chez des handballeurs de niveau élite, une augmentation significative ($p < 0.01$) de la masse musculaire après une période de préparation physique d'une durée de 5 semaines. Pendant cette période, la part relative du travail d'endurance représentait 31%, celle du travail de force était de 29% et le travail spécifique handball représentait 38%.

Des changements similaires à ceux des caractéristiques anthropométriques sont observés concernant les tests de terrain. Nos résultats montrent en effet que VMA, SJ et CMJ sont significativement ($p < 0.05$) plus élevés à TT2, TT3, TT4 et TT5 par rapport à TT1 et que 5m DA est significativement ($p < 0.05$) plus faible à TT2, TT3, TT4 et TT5 par rapport à TT1. Nos résultats corroborent ceux d'[Argus et al. \(2010\)](#) qui montrent, chez des rugbymen professionnels et après une période de préparation physique de début de saison d'une durée de 4 semaines, une augmentation de respectivement $11.1 \pm 2.3\%$ et $11.3 \pm 4.7\%$ des performances à des tests de force maximale réalisés sur le haut et le bas du corps. Les travaux de [Dubois et al. \(2017\)](#) montrent également une augmentation des valeurs de saut en contrebas (drop jump) chez des rugbymen professionnels après une période de préparation physique de 8 semaines. Comme pour les caractéristiques anthropométriques, le niveau initial des qualités physiques de nos handballeurs au début de Pc2P ainsi que le programme d'entraînement proposé pendant Pc2P peuvent expliquer nos résultats. En effet, le phénomène d'effet résiduel de l'entraînement est lié au processus de désadaptation qui peut se produire quand la stimulation de l'entraînement est insuffisante ([Mujika et Padilla, 2001](#)). L'augmentation des performances au cours de Pc2P pourrait être liée à la surcharge de travail proposée pendant Pc2P. [Coutts et al. \(2007\)](#) montrent, chez des joueurs de rugby professionnels, qu'un état de surcharge provoqué délibérément permet d'augmenter les capacités physiques des joueurs de rugby. Sur le plan méthodologique il est important de rappeler, concernant les résultats aux tests de terrain, que si TT1 correspond bien à T1, c'est à dire au début de Pc2P, TT2 ne correspond pas à T2 (fin de Pc2P). TT2 est en effet situé 5 semaines après T2, ce qui signifie que les effets de Pc2P sur les résultats aux tests de terrain sont encore observables 5 semaines après la fin de Pc2P. Ces résultats sont en accord avec les travaux de [Matveiev \(1980\)](#) et ceux de [Issurin \(2008\)](#) qui montrent qu'il existe, suite à l'arrêt d'un entraînement, une persistance, pendant un certain temps, des changements induits par cet entraînement. L'absence de changements significatifs des résultats aux tests de terrain pendant la période compétitive (TT2, TT3, TT4 et TT5) pourrait s'expliquer par un volume d'entraînement insuffisant pour permettre un développement approprié des performances physiques des joueurs

(Gorostiaga et al., 2006). En effet, la part relative dédiée à l'entraînement spécifique handball représentait 77.6 % du temps total pendant la période compétitive. Pendant cette même période, celle dédiée à l'entraînement de la force était de 13.6 % et celle dédiée à l'entraînement en endurance était de 8.8 %. Ces résultats sont similaires à ceux de Dubois et al. (2017) qui montrent, chez des joueurs professionnels de rugby évoluant en Top 14, un temps d'entraînement spécifique au rugby pendant la période compétitive d'environ 80% du temps total d'entraînement. Ces auteurs montrent également un temps d'entraînement consacré à la musculation équivalent à 15% du temps total d'entraînement et un temps d'entraînement consacré au conditionnement physique équivalent à 5% du temps total d'entraînement. Nos résultats sont également similaires à ceux de Gorostiaga et al. (2006). Dans cette étude, réalisée chez des joueurs de handball professionnels, la saison sportive était scindée en trois périodes distinctes : une phase de préparation physique (T1-T2) et deux phases de compétition (T2-T3 et T3-T4). Les résultats de cette étude montrent que le temps passé à l'entraînement des qualités d'endurance équivalait à 31% du temps total d'entraînement entre T1 et T2, à 25% entre T2 et T3 et enfin à 25% entre T3 et T4. Ces auteurs montrent également que le temps passé à l'entraînement des qualités de force équivalait respectivement à 29%, 10% et 17% du temps total d'entraînement sur les mêmes périodes que celles citées précédemment. Enfin, les résultats de cette étude montrent que la part de l'entraînement et des matchs de handball correspondait à 38% du temps total d'entraînement entre T1 et T2, 63.4% entre T2 et T3 et à 58.5% entre T3 et T4. Les qualités physiques des joueurs de notre étude pourraient probablement être améliorées par un entraînement approprié pendant la période de compétition. Toutefois, au cours d'une saison sportive, une équipe élite de handball joue à intervalle régulier avec une moyenne de 2 matchs par semaine pour un total d'environ 60 matchs officiels qui se répartissent entre le championnat national, les coupes nationales, la ligue européenne et le trophée des champions. En plus de ces matchs, les joueurs participent à 180 séances d'entraînement axées sur un travail technique et tactique. Ce cadre spécifique au handball de haut niveau limite donc le temps consacré au développement des capacités physiques (Holm et al., 2004; Schneider et al., 1988; Silva et al., 2013). Dans notre étude, la proportion relative du temps d'entraînement dédié au développement des qualités physiques ne permet donc pas d'augmenter les résultats aux tests de terrain mais elle permet de les maintenir à leur niveau initial (post Pc2P). Ce maintien des qualités physiques au cours de la saison de compétition peut s'expliquer, pour partie, par la variété et la répétition des nombreuses sollicitations physiques et physiologiques lors des entraînements spécifiques en handball. En effet, à un niveau de compétition élevé, beaucoup d'accélération, de décélération, de courses longues, de passes et de tirs (tirs en suspension, tirs en appui avec et sans élan) sont réalisés pendant les séances d'entraînement technico-tactiques ou les matchs (Michalsik et al., 2015b; Povoas et al., 2014). Ces

actions, essentielles à la performance en handball, (Karcher et Buchheit, 2014) sollicitent respectivement les qualités de détente (Pereira et al., 2018), de vitesse (Hermassi et al., 2010) et d'endurance (Michalsik et al., 2013).

Concernant les paramètres biologiques, nos résultats montrent un taux d'Hématocrite significativement ($p < 0.05$) plus faible à T4 par rapport à T1, T3 et T5 et des valeurs moyennes de Ferritine significativement ($p < 0.05$) plus faibles (i) à T5 par rapport à T1, T3 et T4 et (ii) à T4 par rapport à T1. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Brun et al. (2003) qui montrent que la pratique intensive de l'entraînement entraîne une augmentation du volume plasmatique et une diminution de l'Hématocrite. Dans notre étude, la période entre T3-T4 correspond en effet à un volume d'entraînement assez faible au regard des autres périodes de la saison. En revanche, cette période comprend Pc2P2, avec une part de travail physique plus intense par rapport à T2-T3 et à T4-T5. La Ferritine est un marqueur de l'inflammation musculaire dans le cadre du suivi longitudinal des sportifs (Dzedzej et al., 2016). La baisse des valeurs moyennes de Ferritine en fin de saison est en contradiction avec les résultats des travaux de Banfi et al. (2006) qui observent des valeurs de Ferritine en hausse chez des rugbymen de niveau élite en lien avec l'augmentation de la demande physique en fin de saison. Nos résultats montrent également des valeurs moyennes de $[C]_{sg}$ qui sont significativement ($p < 0.05$) plus faibles à T5 par rapport à T1, T3 et T4 et des valeurs de $[T]_{sg}$ significativement ($p < 0.05$) plus élevées à T5 par rapport à T1, T3, T4 et significativement ($p < 0.05$) plus faibles à T3 par rapport à T1 et T4. La tendance générale de nos résultats semble donc indiquer une diminution de $[C]_{sg}$ à mesure que la saison sportive avance, avec dans le même temps (à l'exception de T3) une augmentation de $[T]_{sg}$. Concernant $[C]_{sg}$ nos résultats ne corroborent pas ceux de Schelling et al. (2015) qui montrent, chez des joueurs professionnels de basket-ball jouant plus de 25 minutes par match, que la période de compétition des mois de Mars et Avril est concomitante d'une augmentation significative ($p < 0.01$) des valeurs de $[C]_{sg}$. Les valeurs significativement plus basses de $[C]_{sg}$ observées en fin de saison (T5) semblent attester d'un effet bénéfique de la stratégie de programmation et de récupération proposée pendant la période T4-T5, qui avait pour principal objectif de réduire le nombre de séances d'entraînement intenses afin d'épargner les organismes. Hooper et al. (1999) montrent en effet, chez 7 nageuses de haut niveau, une baisse des valeurs de $[C]_{sg}$ consécutives à 2 semaines d'entraînement indiquant une réponse aiguë à une diminution de la charge d'entraînement, voire même à une diminution de la fatigue. Nos valeurs moyennes de $[T]_{sg}$ à T5 ne corroborent pas celles de Filaire et al. (2001) qui montrent une augmentation de $[C]_{sg}$ et une diminution de $[T]_{sg}$ au cours des 3^{es} et 4^{es} périodes d'une saison professionnelle de football. Ces auteurs précisent toutefois que cette diminution de $[T]_{sg}$ faisait suite à une période d'entraînement à haute intensité. Dans notre étude, la période T4-T5 correspond à un volume total d'entraînement important concomitant d'une in-

tensité d'entraînement plutôt faible ce qui pourrait expliquer nos valeurs de $[T]_{sg}$. Nos résultats concernant IGF-1 montrent des valeurs moyennes significativement ($p < 0.05$) plus faibles d'IGF-1 (i) à T5 par rapport à T1, T3, T4 et (ii) à T4 et T3 par rapport à T1. Les valeurs moyennes d'IGF-1 semblent donc progressivement diminuer à mesure que la saison sportive avance alors que dans le même temps les valeurs moyennes d'IGFBP-3 ne varient pas significativement. Les valeurs moyennes d'IGF-1 de fin de saison sont en accord avec les travaux d'[Eliakim et al. \(2002\)](#) qui montrent, chez des joueurs de handball juniors élites israéliens, une baisse des valeurs d'IGF-1 après une période d'entraînement intensif de 2 semaines. Elles sont également en accord avec les résultats de [Brun et al. \(1996\)](#) qui montrent, chez des gymnastes adolescentes de niveau national, une diminution significative ($p < 0.01$) de 24% d'IGF-1 après 24 semaines d'entraînement intense. Concernant IGFBP-3 nos résultats ne montrent aucun changement significatif de ce paramètre, ce qui semble attester d'un relatif état de fraîcheur de nos joueurs tout au long de la saison. Pour [Eloumi et al. \(2005\)](#) une baisse des valeurs d'IGFBP-3 peut, en effet, témoigner d'un état de fatigue excessif. Concernant $[CK]_{sg}$, nos résultats ne montrent pas de changements significatifs des valeurs moyennes de ce paramètre au cours de la saison. Nos résultats sont cependant en accord avec ceux de [Bresciani et al. \(2010\)](#) qui, chez des handballeurs de niveau national, ne montrent pas de changement significatifs des valeurs moyennes de $[CK]_{sg}$ tout au long d'une saison sportive. Il en est de même pour les résultats de l'étude de [Dubois et al. \(2017\)](#) réalisée chez des rugbyman professionnels. Ces deux études sont très proches de notre modèle d'étude (sports collectifs et saison entière). Elles semblent donc valider nos résultats.

Comme nous venons de le voir, l'analyse des marqueurs biologiques apparaît pertinent dans le cadre du suivi de l'état de forme de sportifs de haut niveau. En revanche, cette démarche devrait être couplée à des marqueurs perceptifs, capables de donner des informations très utiles. Lors de cette étude, nous avons donc soumis les joueurs à des questionnaires subjectifs d'état de forme. Les résultats au questionnaire de Hooper (Tableau 2.12) montrent que les valeurs moyennes des scores de fatigue, de sommeil et de stress sont significativement ($p < 0.05$) plus élevées (i) à T4 par rapport à T1, T2, T3, T5 et (ii) à T3 et T5 par rapport à T1. Nos résultats montrent également que le score de stress est significativement ($p < 0.05$) plus élevé (i) à T2 et T5 par rapport à T1 et (ii) à T3 par rapport à T2 et T5. La tendance générale de ce score est donc d'augmenter depuis T1 jusqu'à T4 puis de diminuer entre T4 et T5. Les scores de fatigue et de sommeil sont significativement ($p < 0.05$) plus élevés à T2 par rapport à T1, T3 et T5. Toutes les valeurs moyennes du score de douleur, sont significativement différentes, avec un score qui augmente significativement depuis T1 jusqu'à T4 et qui diminuent significativement entre T4 et T5. Enfin, pour chacun des scores, les valeurs moyennes les plus élevées sont observées à T4. Ce dernier résultat ne semble pas pouvoir s'expliquer par la quantité d'entraînement puisque la

valeur moyenne la plus faible par semaine de temps d'entraînement spécifique au handball est observée entre T3 et T4. Toutefois, cette période est également celle où le nombre de semaine avec deux matchs par semaine ($n = 7$) est le plus important. Ce paramètre pourrait donc expliquer les valeurs moyennes les plus élevées des différents scores à T4. Nos résultats corroborent ceux de [Clemente et al. \(2017\)](#) qui à partir d'un questionnaire de Hooper montrent, chez des footballeurs professionnels portugais, que le fait de jouer deux matchs par semaine au lieu d'un augmente les scores de fatigue, de douleurs musculaires et de stress. Ces résultats sont liés à des valeurs de DOMS et de fatigue significativement ($p < 0.001$) plus importantes pendant la période à 2 matchs par semaine. Toutefois, les résultats de la figure 2.19 relativisent ceux du tableau 2.12. Ils montrent qu'il est probablement plus intéressant, à l'échelle d'une saison, d'utiliser le questionnaire de Hooper une fois par semaine. Cette augmentation de la fréquence d'administration du questionnaire permet une plus grande précision dans le monitoring de l'état de forme des joueurs et donc dans la gestion de la charge d'entraînement. Nos résultats montrent, en effet, que les valeurs pics des différents scores de Hooper entre T1 et T2 et entre T2 et T3 ne sont pas observées à T2 et à T3 mais entre T1 et T2 (semaine 4) et entre T2 et T3 (semaines 12, 13 et 14). Ils montrent aussi, une nouvelle fois, que les scores les plus élevés (semaines 3, 4 et 5) observés entre T1 et T2 correspondent aux semaines ayant deux matchs par semaine. Plus globalement, nos résultats confirment les travaux de [Zurutuza et al. \(2017\)](#) qui, chez des joueurs semi-professionnels de football espagnols qui effectuaient 3 à 4 entraînements et 1 match par semaine, soulignent l'importance de surveiller le niveau de fatigue des joueurs au moyen de questionnaires à échelle subjective afin de proposer une charge d'entraînement appropriée. Pour ces auteurs l'utilisation d'une stratégie de rotations des joueurs, permettrait d'éviter une accumulation de fatigue qui pourrait s'avérer nuisible en fin de saison. L'analyse des blessures 2.18 à l'échelle de la saison nous permet de tirer au minimum deux enseignements. Le premier est que le nombre relatif de blessés n'est pas très important. Il représente au maximum 4 joueurs blessés en même temps sur un effectif de 19 joueurs. Le deuxième est qu'il semble y avoir deux pics du nombre de joueurs blessés, qui correspondent respectivement à T3 et T4. Comme nous l'avons vu précédemment, pour chacun des scores obtenus au questionnaire de Hooper, les valeurs moyennes les plus élevées sont observées à T4. Ce résultat témoigne probablement d'un état de fatigue assez important des joueurs à cette période qui pourrait expliquer une recrudescence du nombre de blessés à T4. En revanche à T3 les scores obtenus au questionnaire de Hooper sont significativement plus faibles qu'à T4. Toutefois, la figure 2.19 montre que des scores très importants sont observés entre T1 et T2 et entre T3 et T4. Le pic du nombre de joueurs blessés en T3 témoignerait d'un effet cumulé de la charge d'entraînement entre T1 et T3.

Lors de cette étude, nous avons également effectué des tests de VFC sur l'ensemble des joueurs. L'analyse des résultats des valeurs moyennes montre surtout une tendance qui se dégage pour la période T3-T4. En effet, les valeurs observées en position couché montrent une FC qui passe de 53.3 ± 1.7 à 54.6 ± 1.9 , des valeurs de HF qui passent de 2512.8 ± 299.6 à 1871.8 ± 404.3 et des valeurs de RMSSD qui passent de 78.5 ± 11.3 à 68.2 ± 11.2 . Ces résultats témoignent d'une légère baisse de l'activité parasympathique en position couchée laissant supposer un début d'état de fatigue. En effet, les travaux de [Schmitt et al. \(2015a\)](#) montrent qu'il peut exister une typologie de la fatigue à partir de plusieurs modèles définis au départ chez des skieurs nordiques de niveau élite. Ce constat renforce certains autres de nos résultats qui montrent notamment une dégradation des valeurs au questionnaire de Hooper et d'IGF-1 en relation avec un faible volume de travail et une forte intensité au cours de la période comprenant Pc2P2. En revanche, l'analyse des valeurs moyennes du groupe ne nous permettent pas d'aller plus loin dans les conclusions. Le test de VFC peut donner des indications très utiles sur le fonctionnement du SNA. Pour cela, un test isolé ne suffit pas et la comparaison de plusieurs tests s'avère nécessaire dans l'interprétation des résultats et les préconisations de réajustement si nécessaire. De plus, le test doit avant tout s'analyser de manière individuelle pour identifier des typologies de fatigue propres à chaque joueur ([Schmitt et al., 2015a](#)).

2.6.5 Applications pratiques

Il est important de conclure ce travail de recherche en essayant de proposer des applications pratiques aux personnes confrontées à la problématique de la gestion d'une équipe de sport collectif. Le cumul d'entraînements et de compétition peut favoriser l'apparition d'un état de fatigue. Cette fatigue, relevée à partir de différents marqueurs, peut entraîner une baisse des performances et/ou une augmentation des blessures. Afin de rester compétitif, il serait pertinent pour le préparateur physique d'individualiser un maximum les plans d'entraînement. Des états de surmenage ou de sous entraînement ([Gabbett, 2016](#)) ne sont pas propices à la performance. Les joueurs blessés devraient pouvoir réintégrer l'effectif progressivement afin de favoriser un retour à la compétition sans risque potentiel de récurrence ([Blanch et Gabbett, 2015](#)). Cette phase, souvent tronquée par les entraîneurs, servirait au développement de certaines qualités physiques.

2.7 Discussion générale

Les résultats les plus importants de nos deux premières études représentent des pistes de travail intéressantes pour les préparateurs physiques et les entraîneurs. Premièrement, Pc2P est une période déterminante pour commencer une saison de handball dans les meilleures conditions. Comme le soulignent [Silva et al. \(2013\)](#), Pc2P doit avoir comme objectif principal d'augmenter un maximum les niveaux de force et de puissance afin de garder des valeurs importantes le plus longtemps possible pendant la saison puisque, comme le montre notre deuxième étude, les valeurs de PC et PM n'évoluent plus significativement pendant la saison. Ensuite, les résultats non significatifs de notre première étude observés pour PC à $60^\circ \cdot s^{-1}$ au niveau de Q du côté dominant et non dominant, nous rappellent combien il est difficile de développer plusieurs qualités physiques en même temps, notamment la force et l'endurance. Les travaux d'[Issurin \(2008\)](#) montrent également la difficulté de trouver le bon dosage d'entraînement afin de faire progresser les athlètes de manière importante. Cet auteur propose de développer les qualités physiques par bloc selon les objectifs. Chaque bloc est isolé des autres blocs. Ce type d'entraînement en bloc-périodique permettrait certainement d'éviter les problèmes de compatibilité entre les qualités physiques et présupposerait un développement consécutif d'habiletés choisies en amont ([Issurin, 2010](#)). Cette approche, même s'il elle paraît séduisante pour un objectif de développement optimal des qualités physiques dans un sport individuel où les compétitions sont massées, apparaît cependant décontextualisée dans un sport collectif. En effet, l'organisation d'une saison de compétition en sport collectif est particulière. Pc2P est trop courte pour espérer alterner les différents blocs de développement. Il en est de même pour les périodes compétitives comprenant des matchs hebdomadaires ou bi-hebdomadaires, qui ne laissent pas la place à ce genre de programmation. Au cours de notre troisième étude, nous avons analysé le temps passé à l'entraînement en fonction des différents contenus proposés pendant une saison de compétition. Nos résultats montrent que le temps imparti à la pratique du handball est de plus en plus important au fur et à mesure de la saison. Avec l'arrivée du professionnalisme, la saison sportive est en effet de plus en plus longue et contraignante. Elle exige de plus en plus de temps passé à l'entraînement, avec une multiplication des matchs et des déplacements en France et à l'étranger. De plus, l'augmentation des contraintes imposées aux joueurs, avec des sollicitations extra sportives de plus en plus importantes, nécessite de la part des staffs techniques une programmation très rigoureuse de l'entraînement. A court terme, l'effet fatigue engendrée par toutes ces contraintes peut se caractériser par une baisse des performances. A plus long terme, les joueurs peuvent être en difficulté physique ou psychologique importante, provoquant une augmentation non négligeable du nombre de blessures. Les travaux de [Halson \(2014\)](#) montrent qu'une gestion régulière et adaptée

de la charge d'entraînement apporte des informations utiles aux staffs techniques et permet une meilleure gestion de la performance des sportifs. Les études qui s'intéressent aux variations de l'état de forme de sportifs de très haut niveau à l'échelle d'une saison sont rares. Les travaux de Burgess (2017) nous montrent que ces études sont rarement réalisées sur des équipes de sport collectif avec un très haut niveau de pratique et qu'il faut être prudent sur les conclusions qui en découlent. Néanmoins, la plupart des études s'accordent sur le fait que le nombre et la fréquence des matchs joués pendant une saison peuvent affecter le niveau physique des athlètes (Cormack et al., 2008; Johnston et al., 2013). L'étude de Bengtsson et al. (2013), réalisée sur 11 années consécutives, comprenant 130 000 matchs de football professionnel, montre que l'enchaînement des matchs avec moins de 5 jours de récupération peut induire un risque accru de blessure. Ces auteurs suggèrent que le staff technique devrait le plus souvent possible faire tourner son effectif pour maintenir l'état de forme des joueurs à un bon niveau sur toute une saison. Ces résultats vont dans le sens des travaux de Dellal et al. (2015) qui montrent qu'il existe une relation entre les périodes où les matchs s'enchaînent à haute fréquence et le risque de blessure. Cette accumulation de matchs peut induire un état de fatigue amenant parfois le sportif dans un état de surmenage et de blessures (Lindsay et al., 2015). De plus, certains travaux ont montré dans les sports de contact, que la blessure survient pour 60% à cause des collisions et que 40% serait corrélée de manière importante ($r = 0.67$) avec la gestion de la charge d'entraînement (Gabbett, 2005). Il devient alors pertinent de monitorer certains marqueurs à l'échelle d'une saison entière de compétition afin d'étudier l'effet dose-réponse de l'entraînement. Cette démarche doit permettre de mieux comprendre les adaptations et désadaptations subies par le joueur dans sa pratique de haut niveau et d'ajuster les contenus d'entraînement tout au long de la saison. De plus, comme le décrivent Mujika et al. (2018) dans leur récente étude, une périodisation stratégique de l'entraînement, prenant en compte un grand nombre de facteurs impliqués toute la saison dans la performance comme les voyages, la nutrition ou encore les moments dédiés à l'entraînement, peut favoriser les adaptations physiologiques et la capacité de performance. Malgré notre volonté initiale d'avoir une approche systémique dans le suivi longitudinal d'une équipe de handball de très haut niveau, plusieurs limites sont apparues. La première est principalement l'absence de groupe contrôle lors des 2 premières études. Au regard des enjeux sportifs et du niveau des joueurs, il était inconcevable de constituer plusieurs groupes susceptibles d'induire des différences de niveau de forme au sein de l'équipe. De plus, il aurait été intéressant de pouvoir procéder à des évaluations plus régulièrement et surtout de manière parfaitement concomitante avec les périodes de préparation et de compétition. Là encore, les contraintes d'une équipe de club, évoluant en 1^{re} division française, participant à toutes les compétitions nationales et européennes et jouant régulièrement 2 matchs par semaine, n'ont pas permis d'atteindre

cet objectif initial. D'autres travaux, s'intéressant à des joueurs de haut niveau, se sont heurtés aux mêmes problèmes méthodologiques (Bresciani et al., 2010).

Conclusions et perspectives

La performance de haut-niveau requiert la prise en charge la plus complète possible du sportif. La professionnalisation du handball, comme pour d'autres sports collectifs, a engendré une augmentation significative du volume et de l'intensité générale des entraînements et des matchs. Le suivi de la charge d'entraînement devient alors prépondérant pour faire face à des calendriers de plus en plus surchargés, augmentant de façon importante la sollicitation des sportifs professionnels. Pour bien comprendre toutes les contraintes qui leur sont imposées, il est nécessaire de monitorer leur activité. Le monitoring de CE_{ext} est possible grâce à l'apport des nouvelles technologies qui permettent aujourd'hui de mieux quantifier la dose d'entraînement appliquée chaque jour au sportif. Dans le même temps il est nécessaire de s'intéresser aux réponses de l'organisme à cette CE_{ext} . Cette estimation de la réponse physique, biologique et psychologique est complexe à aborder. Le choix des marqueurs utilisés est très important. L'ère actuelle est au big data, avec une utilisation massive d'outils de mesure qui permettent de quantifier le niveau d'activité physique. Cette tendance est omniprésente dans la société actuelle et depuis quelques temps, dans la majeure partie des structures sportives professionnelles, ce qui demande beaucoup de temps et d'énergie pour le traitement et l'interprétation des données recueillies. Il faut néanmoins rester vigilant sur leur utilisation et ne pas oublier que le sportif est complexe, capable d'évolution et de changements en fonction de paramètres non mesurables comme par exemple les sources de motivation, les enjeux sportifs ou d'autres encore. Cette approche doit nous alerter sur les ressources personnelles développées par le sportif en fonction de son environnement. La compréhension de la capacité du sportif à s'adapter positivement à la charge d'entraînement interroge la plupart des staffs techniques et des chercheurs. Connaître le niveau de disponibilité du joueur à s'entraîner et à jouer permettrait à l'entraîneur d'adapter son contenu de manière précise. Certains travaux de recherche mesurent la charge cognitive des sportifs. Cette fatigue mentale, considérée comme un état psychobiologique, serait concomitante de périodes prolongées d'activité cognitive exigeante (Cutsem et al., 2017) susceptible de provoquer une diminution de la performance physique (Marcora et al., 2009). Malheureusement, ces nouvelles pistes de recherche sont encore peu utilisées en routine dans le milieu du sport professionnel. D'autres travaux s'intéressent à de nouvelles techniques

d'investigation, comme l'étude de la variation pupillaire (Zenon et al., 2014). La recherche scientifique avance à grands pas et il est fort probable que d'ici quelques années, il sera possible de mesurer précisément ces nouvelles variables, ou d'autres afin d'avoir une vision globale des réponses à l'entraînement. L'intégration de ces résultats dans de nouvelles équations permettra peut-être de gérer plus globalement la charge d'entraînement et aussi d'expliquer pourquoi parfois des sportifs de très haut niveau, ayant des indicateurs physiques, biologiques, techniques et tactiques satisfaisants, ne sont plus performants. Dans le monde sportif professionnel actuel, l'optimisation de la performance doit être appréhendée de manière systémique, avec une relation étroite entre l'approche de terrain et la recherche scientifique, pour mieux comprendre l'évolution du sportif de haut niveau dans son environnement.

A ce jour, de nombreux travaux ont étudié l'activité du joueur de handball. Même si la plupart de ces études n'analysent pas l'activité de joueurs adultes de niveau international, certaines d'entre elles ont décrit cette activité de manière précise (Karcher et Buchheit, 2014; Michalsik et al., 2013, 2015a; Povoas et al., 2014, 2012). Au cours de notre travail, nous avons également équipé les joueurs de modules comprenant un accéléromètre triaxial couplé à un gyroscope et à un magnétomètre, afin de monitorer l'activité des joueurs du Montpellier Handball par poste de jeu. En raison du calendrier sportif et de mon niveau d'implication avec l'effectif professionnel, ce monitoring n'a pu se faire que sur cinq semaines de compétition pendant la saison. Durant ces cinq semaines, cinq joueurs occupant les principaux postes de jeu (AiL, AL, GB, DC et PvT) ont été équipés de ce type de matériel. Les paramètres analysés étaient les accélérations, les décélérations, les changements de direction et le PlayerLoad (algorithme de calcul qui permet de quantifier la charge d'entraînement). Ces données ont été recueillies lors de chaque séance d'entraînement. L'organisation des semaines était la même, basée sur des thèmes différents, à savoir, le jeu défensif, le jeu offensif, le jeu de transition, les savoirs-faire techniques et un match simulé. La première séance, réalisée au retour de compétition, servait de reprise de contact avec le travail de technique individuelle. La deuxième séance avait pour objectif de mettre en place le système collectif de défense qui allait être adopté. En milieu de semaine, le groupe réalisait une opposition sur tout le terrain, entre les 2 collectifs. La séance suivante était consacrée à la mise en place du jeu d'attaque. Enfin, la séance proche du match servait de séance de révision de schémas tactiques précis en fonction de l'adversaire rencontré lors du match suivant. Cette répartition des séances dans la semaine était souhaitée par l'entraîneur au regard de son modèle de performance et de son expérience. Les séances à fortes intensités se déroulaient donc plutôt en début de semaine, tandis que celles à plus faibles intensités étaient placées en fin de semaine. Lors de ces semaines types, les joueurs étaient également équipés de cardio-fréquencemètres afin de mesurer la fréquence cardiaque (FC) lors de chaque séance et de calculer la fré-

quence cardiaque moyenne (FC_{moy}) et la FC_{max} . De plus, les joueurs évaluaient la difficulté de chaque séance à partir d'une échelle RPE (Foster et al., 2001). Nous avons donc pu quantifier CE (en unité arbitraire) à partir de sRPE en multipliant le temps d'entraînement en minutes par la note de RPE. L'analyse des données est en cours de traitement. Les résultats devraient nous permettre de préciser la charge d'entraînement qui correspond à une thématique d'entraînement donnée. Ils devraient également nous permettre de préciser la charge d'entraînement, quelle que soit la thématique, en fonction du jour de la semaine. Ils devraient enfin permettre, à moyen et court terme, une meilleure régulation de la charge d'entraînement sur une saison. C'est le principal objectif recherché dans un but d'optimisation de la performance individuelle des joueurs et de la performance collective de l'équipe. Dans les équipes de sports collectifs, beaucoup d'entraîneurs préfèrent en effet augmenter le volume de travail en début de semaine et l'alléger sur les jours précédents le match. Cela va dans le sens des travaux de Manzi et al. (2010) qui, chez des basketteurs professionnels préconisent un allègement du travail 3 jours avant le match pour atténuer la fatigue. Une approche intéressante serait d'inverser la stratégie de programmation hebdomadaire. Morin (2015) évoque la possibilité de faire évoluer la forme de relation volume-intensité au cours de la semaine. Cet auteur préconise de déplacer la séance d'intensité sur la fin de semaine. L'approche est intéressante, elle demande toutefois de rester prudent. En effet, pour certains sports collectifs qui comprennent de nombreux contacts, cela peut s'avérer préjudiciable si les séances proches du match s'effectuent à une forte intensité. Le nombre de contacts physiques créent des lésions traumatiques qui pourraient handicaper le joueur pour le match du lendemain ou du surlendemain. C'est le cas notamment en rugby, où les entraîneurs préfèrent alléger les séances de fin de semaine afin de préserver les organismes des joueurs. Les travaux de Dubois et al. (2017) nous sensibilisent notamment sur l'organisation d'une semaine type pour une équipe de top 14, avec notamment une fin de semaine qui comprend une séance d'agilité et de vitesse 2 jours avant le match et la séance du capitaine (mise en place tactique à très faible intensité) la veille de match.

L'amélioration du monitoring des joueurs en sport collectif pourrait représenter l'avenir dans les clubs professionnels en sport collectif. Les avancées technologiques, avec une validité et une fiabilité accrue des vêtements capteurisés, pourrait permettre de mieux cerner la pratique sportive des joueurs et le coût énergétique de l'ensemble des contraintes subies par le groupe. De nombreuses sollicitations ne rentrent actuellement pas en compte dans les différents monitoring. Le "coût" d'un long voyage, d'une journée de sollicitations avec les médias ou plus communément encore, une vie de famille bien remplie avec une femme et des enfants n'est pas sans conséquence sur la capacité de récupération du sportif. Il semblerait toutefois que de nombreuses structures n'en tiennent pas assez compte. L'avancée des connaissances en sciences du sport devrait permettre d'identifier

encore plus de paramètres susceptibles d'influencer la performance. Les facteurs impactant réellement la performance ne sont pas forcément liés à l'entraînement et la solution est peut-être ailleurs.

Bibliographie

- Aagaard, P., E. Simonsen, J. Andersen, P. Magnusson et P. Dyhre-Poulsen. 2002, «Increased rate of strength development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training», *J Appl Physiol*, vol. 93, p. 114
- Aagaard, P., E. Simonsen, S. Magnusson, B. Larsson et P. Dyhre-Poulsen. 1998, «A new concept for isokinetic hamstring : quadriceps muscle strength ratio», *Am J Sport Me*, vol. 26, p. 231–237. 138
- Achten, J. et A. Jeukendrup. 2003, «Heart rate monitoring : Applications and limitations», *Sports Medicine*, vol. 33, n° 7, p. 517–538. 12, 14, 79, 105
- Akselrod, S., D. Gordon, J. Madwed, N. Snidman, D. Shannon et R. Cohen. 1985, «Hemodynamic regulation : Investigation by spectral analysis», *Am J Physiol*, vol. 249, n° 4, p. 867–875. 100
- Akselrod, S., D. Gordon, F. Ubel, D. Shannon, A. Berger et R. Cohen. 1981, «Power spectrum analysis of heart rate fluctuation : A quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control», *Science*, vol. 10, n° 213(4504), p. 220–222. 98, 100, 101
- Akubat, I., E. Patel, S. Barrett et G. Abt. 2012, «Methods of monitoring the training and match load and their relationship to changes in fitness in professional youth soccer players», *J Sports Sci*, vol. 30, n° 14, p. 1473–1480. 84, 86
- Al-Lail, A. 2001, «A motion analysis of the work-rate & heart rate of the elite kuwayti handball players», <http://www.sportscoach-sci.com>. 22, 28
- Alaphilippe, A., S. Mandigout, S. Ratel, J. Bonis, D. Courteix et M. Duclos. 2012, «Longitudinal follow-up of biochemical markers of fatigue throughout a sporting season in young elite rugby players», *J Strength Cond Res*, vol. 26, n° 12, p. 3376–3384. 91
- Alexander, M. et S. Boreskie. 1989, «An analysis of fitness and time-motion characteristics of handball», *Am J Sports Med*, vol. 17, n° 1, p. 76–82. 47, 49

- Alexiou, H. et A. Coutts. 2008, «A comparison of methods used for quantifying internal training load in women soccer players», *Int J Sports Physiol Perform*, vol. 3, n° 3, p. 320–330. 79
- Andersen, L. L., J. L. Andersen, S. P. Magnusson, C. Suetta, J. L. Madsen, L. R. Christensen et P. Aagaard. 2005, «Changes in the human muscle strength-velocity relationship in response to resistance training and subsequent detraining.», *J Appl Physiol*, vol. 99, p. 87–94. 136
- Andrade, M. D. S., C. A. B. D. Lira, F. D. C. Koffes, N. C. Mascarin, A. A. Benedito-Silva et A. C. D. Silva. 2012, «Isokinetic hamstrings-to-quadriceps peak torque ratio : The influence of sport modality, gender, and angular velocity», *Journal of Sports Sciences*, vol. 30, n° 6, doi :10.1080/02640414.2011.644249, p. 547–553. 138
- Argus, C., N. Gill, J. Keogh, W. Hopkins et C. Beaven. 2010, «Effects of a short-term pre-season training programme on the body composition and anaerobic performance of professional rugby union players», *J Sports Sci*, vol. 28, n° 6, p. 679–686. 115, 161, 162
- Ascensao, A., A. Rebelo, E. Oliveira, F. Marques, L. Pereira et J. Magalhaes. 2008, «Biochemical impact of a soccer match - analysis of oxidative stress and muscle damage markers throughout recovery», *Clinical Biochemistry*, vol. 41, n° 10, p. 841–851. 41(10-11), 841-851. 93
- Astrand, P. et I. Ryhming. 1954, «A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during sub-maximal work», *J Appl Physiol*, vol. 7, n° 2, p. 218–221. 13, 14, 44
- Aubert, A., B. Seps et F. Beckers. 2003, «Heart rate variability in athletes», *Sports Med*. 33(12) :889-919. 105
- Aughey, R. 2011, «Applications of GPS technologies to field sports», *Int J Sports Physiol Perform*. 6(3) : 295-310. 15
- Augustsson, J. et R. Thomee. 2000, «Ability of closed and open kinetic chain tests of muscular strength to assess functional performance», *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, vol. 10, p. 164–8. 114
- Avalos, M., P. Hellard et J. C. Chatard. 2003, «Modeling the training-performance relationship using a mixed model in elite swimmers.», *Med Sci Sports Exerc*, vol. 35, n° 5, p. 838–846. 83
- Ayalon, A., O. Inbar et O. Bar-Or. 1974, «Relationships among measurements of explosive strength and anaerobic power», *Biomechanics IV. International series on sport sciences. Baltimore : University Press*, p. 572—577. 50

- Banfi, G., F. Del, M. Mauris, M. Corsi et G. Melegati. 2006, «Haematological parameters in elite rugby players during a competitive season», *Clin Lab Haematol.* 28(3) : 183-188. 87, 91, 144, 164
- Bangsbo, J. 1994, «The physiology of soccer with special reference to intense intermittent exercise», *Acta Physiol Scand Suppl.* 619 1-155. 48, 53
- Banister, E., T. Calvert, M. Savage et A. Bach. 1975, «A system model of training for athletic performance», *Aust J Sports Med.* 7 : 170- 176. x, 71, 72, 77
- Banister, E. et C. Hamilton. 1985, «Variations in iron status with fatigue modelled from training in female distance runners», *European Journal of Applied physiology and Occupational Physiology.* 54(1), 16 - 23,. 68, 144
- Bar-Or, O., R. Dotan et O. Inbar. 1977, «A 30 second all-out ergometric test reliability and validity for anaerobic capacity», *Israel Journal of Medical Sciences*, p. 13–126. 51
- Barris, S. et C. Button. 2008, «A review of vision-based motion analysis in sport», *Sports Med.* 38 : 1025 - 1043. 7
- Bassett, D., M. Yang, N. Wymbs et S. Grafton. 2015, «Learning-induced autonomy of sensorimotor systems», *Nat Neurosci.* 18(5) :744-51. 10
- Bauduer, F., C. Monchaux et M. Burtin. 2011, «Biochemical disturbances, deshydration, recovery and professional rugby-data from the longitudinal survey of the Ligue nationale de rugby and the use of the multifrequency bioimpedance assessment.», *Science & Sports*, vol. 26, n° 1, p. 19–24. 90, 91
- Bayios, I., E. Anastasopoulou, D. Sioudris et K. Boudolos. 2001, «Relationship between isokinetic strength of the internal and external shoulder rotators and ball velocity in team handball», *J Sports Med Phys Fitness.* Jun;41(2) :229-35. 37
- Behm, D. G. et D. G. Sale. 1993, «Velocity specificity of resistance training.», *Sports Med*, vol. 15, p. 374–388. 137
- Bengtsson, H., J. Ekstrand et M. Häggglund. 2013, «Muscle injury rates in professional football increase with fixture congestion : an 11-year follow-up of the UEFA champions league injury study», *British Journal of Sports Medicine*, vol. 47, n° 12, doi : 10.1136/bjsports-2013-092383, p. 743–747. 169
- Berger, R. 1961, «Determination of the resistance load for 1-rm and 10-rm», *Journal of the Association for Physical and Mental Rehabilitation*, vol. 15, p. 108–110. xiii, 56

- Bernard, P. et F. Verdera. 2008, «Renforcement musculaire et reprogrammation motrice», part. Renforcement musculaire : bases physiologiques, méthodes d'entraînement et techniques de mesure de la force musculaire. 55
- Bernard, P.-L. et M. Amato. 2009, «Influence de la pratique sportive et de l'âge sur les adaptations musculaires du genou : application au football et à la gymnastique», *Science & Sports*, vol. 24, n° 3-4, doi :10.1016/j.scispo.2008.03.007, p. 173–177. 114
- Berntson, G., J. Bigger, D. Eckberg, P. Grossman, P. Kaufmann, M. Malik, H. Nagaraja, S. Porges, J. Saul, P. Stone et d. van. 1997, «Heart rate variability : Origins, methods, and interpretive caveats», *Psychophysiology*. 34(6) :623-48. 105
- Bigger, J., J. Fleiss, L. Rolnitzky et R. Steinman. 1993, «Frequency domain measures of heart period variability to assess risk late after myocardial infarction», *J Am Coll Cardiol*. 21(3) :729-36. 105
- Blanch, P. et T. J. Gabbett. 2015, «Has the athlete trained enough to return to play safely? the acute :chronic workload ratio permits clinicians to quantify a player's risk of subsequent injury», *British Journal of Sports Medicine*, vol. 50, n° 8, doi :10.1136/bjsports-2015-095445, p. 471–475. 167
- Bon, M. 2001, «Kvantificirano vrednotenje obremenitev in spremljanje srčne frekvence igralcev rokometna med tekmo, [Quantified evaluation of loading and monitoring of heart rate of handball players in a match; In Slovenian] (Unpublished doctoral dissertation, University of Ljubljana)», . 25, 47, 49
- Borg, G. 1970, «Perceived exertion as an indicator of somatic stress», *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, vol. 2, p. 92–98. xiii, 80
- Borg, G. et P. Borg. 1987, «On the relations between category scales and ratio scales and a method for scale transformation», *Reports from the department of psychology, University of stockholm*, vol. 672. 75
- Borresen, J. et M. Lambert. 2009, «The quantification of training load, the training response and the effect on performance», *Sports Med*. 39(9) :779-95. 68, 69, 79, 144
- Bosco, C. 1992, «Evaluation de la force par le test de bosco», *Stampa Sportiva, Rome*. 57
- Bosco, C. et P. Komi. 1979, «Potentiation of the mechanical behavior of the human skeletal muscle through prestretching», *Acta Physiologica Scandinavica*, vol. 106, n° 4, doi :10.1111/j.1748-1716.1979.tb06427.x, p. 467–472. 151

- Bosquet, L., S. Merkari, D. Arvisais et A. Aubert. 2008, «Is heart rate a convenient tool to monitor over-reaching? A systematic review of the literature», *Br J Sports Med.* 42(9) :709-14. 15, 68, 79, 105
- Boullosa, D., L. Abreu, J. Tuimil et A. Leicht. 2012, «Impact of a soccer match on the cardiac autonomic control of referees.», *Eur J Appl Physiol*, vol. 112, n° 6. 107
- Bouten, C., K. Westerterp, M. Verduin et J. Janssen. 1994, «Assessment of energy expenditure for physical activity using a triaxial accelerometer», *Med Sci Sports Exerc.* 26(12) :1516-23. 11
- Bradley, J. et J. Tibone. 1991, «Electromyographic analysis of muscle action about the shoulder», *Clin Sports Med.* 10(4) :789-805. 60
- Brage, S., N. Wedderkopp, P. Franks, L. Andersen et K. Froberg. 2003, «Reexamination of validity and reliability of the CSA monitor in walking and running», *Med Sci Sports Exerc.* 35(8) :1447-54. 12
- Bresciani, G., M. Cuevas, N. Garatachea, N. Molinero, M. Almar, J. De Paz, S. Marquez et J. Gonzalez-Gallego. 2010, «Monitoring biological and psychological measures throughout an entire season in male handball players», *Eur J Sport Sci*, vol. 10, n° 6, p. 337–384. xiii, 4, 85, 86, 93, 94, 112, 115, 145, 165, 170
- Brewer, C., B. Dawson, J. Heasman, G. Stewart et S. Cormack. 2010, «Movement pattern comparisons in elite (afl) and sub-elite (waf) australian football games using gps», *J Sci Med Sport.* 19
- Bricout, V., S. Dechenaud et A. Favre-Juvin. 2010, «Analyses of heart rate variability in young soccer players : The effects of sport activity», *Auton Neurosci.* 19; 154(1-2) :112-6. 107
- Bricout, V. A., M. Guinot, M. Duclos, N. Koulmann, B. Serrurier, J.-F. Brune, P. Flore, J.-C. Chatard, X. Bigard et A. Favre-Juvin. 2006, «Position statement : Contribution of the biologic analyses in the diagnosis of overtraining syndrome», *Science & Sports*, vol. 21, n° 6, p. 319–350. 92, 93
- Brink, M., C. Visscher, S. Arends, J. Zwerver, W. Post et K. Lemmink. 2010, «Monitoring stress and recovery : New insights for the prevention of injuries and illnesses in elite youth soccer players», *Br J Sports Med.* 44(11) :809-15. 84
- Brooks, J., C. Fuller, S. Kemp et D. Reddin. 2008, «An assessment of training volume in professional rugby union and its impact on the incidence, severity, and nature of match and training injuries», *J Sports Sci.* 26(8) :863-73. 84

- Brue, F. 1985, «Une variante du test progressif et maximal de léger et boucher : Le test vitesse maximale aérobie derrière cycliste (test vma)», *Bulletin médical de la Fédération Française d'athlétisme*, vol. 7, p. 1–18. 44
- Brun, C., A. Guénoche et B. Jacq. 2003, «Approach of the functional evolution of duplicated genes in *saccharomyces cerevisiae* using a new classification method based on protein-protein interaction data.», *Journal of structural and functional genomics*, vol. 3, p. 213–224, ISSN 1345-711X. 164
- Brun, J. F., C. Bouchahda, D. Chaze, A. A. Benhaddad, J. P. Micallef et J. Mercier. 2000, «The paradox of hematocrit in exercise physiology : Which is the "normal" range from an hemorheologist's viewpoint?», *Clin Hemorheol Microcirc*, vol. 22(4) :287-303. 92
- Brun, J. F., O. Bouix, J. F. Monnier, C. Blachon, N. Jourdan, M. T. Baccara, C. Fédou et A. Orsetti. 1996, «Increased insulin sensitivity and basal insulin effectiveness in postprandial reactive hypoglycaemia», *Acta Diabetol*, vol. 33, n° 1, p. 1–6. 92, 165
- Brzycki, M. 1993, «Strength testing – predicting a one-rep max from reps to fatigue», *JO-PERD*, p. 64, 88–90. xiii, 56, 57
- Buchheit, M. 2009, «The 30-15 Intermittent Fitness Test : 10 year review», vol. 1. 44, 112
- Buchheit, M. 2014, «Programming high intensity interval training in handball», *Aspetar Sports Med J.* (3). 108
- Buchheit, M., G. Andrew et J.-B. Morin. 2015, «Assessing Stride Variables and Vertical Stiffness with GPS-Embedded Accelerometers : Preliminary Insights for the Monitoring of Neuromuscular Fatigue on the Field», *J Sports Sci Medicine*, vol. 14, n° 4, p. 698—701. 107
- Buchheit, M., B. Haydar et S. Ahmaidi. 2012, «Repeated sprints with directional changes : Do angles matter?», *J Sport Sci*, vol. 30, p. 555–562. 141
- Buchheit, M. et P. Laursen. 2014, «High intensity interval training, solutions to the programming puzzle : Part I : Cardiopulmonary emphasis», *Sports Med J.* 43(5) : 313 - 338. 17, 108
- Buchheit, M., P. Laursen, J. Kuhnle, D. Ruch, C. Renaud et S. Ahmaidi. 2009a, «Game-based Training in Young Elite Handball Players», *Int J Sports Med.* 30 : 251-25. 3
- Buchheit, M., P. Lepretre, A. Behaegel, G. Millet, G. Cuvelier et S. Ahmaidi. 2009b, «Cardio-respiratory responses during running and sport-specific exercise in handball players», *Journal of Sciences and Medicine in Sport.* 12 : 399-405. 4, 46, 47

- Buchheit, M., A. Mendez-Villanueva, M. Quod, N. Poulos et P. Bourdon. 2010, «Determinants of the variability of heart rate measures during a competitive period in young soccer players», *Eur J Appl Physiol*. 109 : 869-878. 105
- Buchheit, M., G. Millet, A. Parisy, S. Pourchez, P. Laursen et S. Ahmaidi. 2008, «Supramaximal training and post-exercise parasympathetic reactivation in adolescents», *Med Sci Sports Exerc*. 40 : 362-371. 4, 54, 105
- Buchheit, M., M. Simpson, H. Al, P. Bourdon et A. Mendez-Villanueva. 2011, «Monitoring changes in physical performance with heart rate measures in young soccer players», *Eur J Appl Physiol*. 105
- Budgett, R. 1998, «Fatigue and underperformance in athletes : The overtraining syndrome», *Br J Sports Med*, vol. 32, p. 107–110. 69
- Burgess, D. J. 2017, «The research doesn't always apply : Practical solutions to evidence-based training-load monitoring in elite team sports», *International Journal of Sports Physiology and Performance*, vol. 12, n° Suppl 2, doi :10.1123/ijsp.2016-0608, p. S2–136–S2–141. 169
- Burke, L., R. Gollan et R. Read. 1986, «Seasonal changes in body composition in Australian Rules footballers», *Br J Sports Med*. 20(2) :69-71. 43
- Busso, T., H. Benoit, R. Bonnefoy, L. Feasson et J. Lacour. 2002, «Effects of training frequency on the dynamics of performance response to a single training bout», *J Appl Physiol (1985)*. 92(2) :572-80. 68
- Busso, T., R. Candau et J. Lacour. 1994, «Fatigue and fitness modelled from the effects of training on performance», *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 69(1) :50-4. 73, 79
- Busso, T., C. Carasso et J. Lacour. 1991, «Adequacy of a systems structure in the modeling of training effects on performance», *J Appl Physiol*. 73, 79
- Busso, T., C. Denis, R. Bonnefoy, A. Geysant et J. Lacour. 1997, «Modeling of adaptations to physical training by using a recursive least squares algorithm», *J Appl Physiol (1985)*. 82(5) :1685-93. 74
- Butte, N., U. Ekelund et K. Westerterp. 2012, «Assessing physical activity using wearable monitors : Measures of physical activity», *Med Sci Sports Exerc*. 44(1 S) : 5-12. 11, 18
- Calmels, P. et P. Minaire. 1995, «Are view of the role of the agonist/antagonist muscle pairs ratio in rehabilitation», *Disabil and Rehabil*, vol. 17, n° 6, p. 266–276. 60, 114

- Calvert, T., E. Banister, M. Savage et T. Bach. 1976, «A system model of the effects of training on physical performances», *IEE Trans on systems, man, and cybernetics*. SMC 6 : 94-102. 73
- Cambel, K. 1985, «An assessment of the movement requirements of elite team handball athletes», *Sports Med*. 3 : 23-30. 21
- Candau, R., T. Busson et J. Lacour. 1992, «Effects on training on iron status in crosscountry skiers», *European Journal of Applied Physiology*, vol. 64, n° 6, p. 497–502. 73, 93
- Cannon, W. 1932, *The Wisdom of the Body*, thèse de doctorat, New york, NY. 68
- Cardinale, M., R. Whiteley, A. Hosny et N. Popovic. 2016, «Activity Profiles and Positional Differences of Handball Players During the World Championships in Qatar 2015», *Int J Sports Physiol Perform*. 5 :1-23. 3, 9, 26, 27, 30, 112
- Carter, J. 1984, «Physical structure of Olympic Athletes. Part II : Kinanthropometry of Olympic Athletes», part. Somatotypes of Olympic athletes, Karger, p. 80—109. 35
- Carvalho, A., P. Mourao et E. Abade. 2014, «Effects of Strength Training Combined with Specific Plyometric exercises on body composition, vertical jump height and lower limb strength development in elite male handball players : A case study», *Journal of Human Kinetics*, vol. 41, p. 125–132. 66, 67
- Casamichana, D., J. Castellano, J. Calleja-Gonzalez, R. San et C. Castagna. 2013, «Relationship between indicators of training load in soccer players», *J Strength Cond Res*. 27(2) : 369-74. 33, 84
- Castellano, J., A. Blanco-Villasenor et D. Alvarez. 2011, «Contextual variables and time-motion analysis in soccer», *Int J Sports Med*. 32(6) :415-21. 17
- Castellano, J. et D. Casamichana. 2010, «Heart Rate and Motion Analysis by GPS in Beach Soccer», *J Sports Sci Med*. 1;9(1) :98-103. 19
- Cazorla, G. et L. Léger. 1993, «Comment évaluer et développer vos capacités aérobies», part. Epreuves de course navette et épreuve Vam-eval. 44
- Chaouachi, A., M. Brughelli, G. Levin, N. Boudhina, J. Cronin et K. Chamari. 2009, «Anthropometric, physiological and performance characteristics of elite team handball players», *Journal of Sports Sciences*. 27(2) : 151 - 157. 4, 34, 38, 48, 49, 52, 161
- Charlot, K., P. Zongo, A. S. Leicht, O. Hue et O. Galy. 2015, «Intensity, recovery kinetics and well-being indices are not altered during an official FIFA futsal tournament in oceanian players», *Journal of Sports Sciences*, vol. 34, n° 4, doi :10.1080/02640414.2015.1056822, p. 379–388. 145

- Chatard, J. et B. Wilson. 2003, «Drafting distance in swimming», *Med Sci Sports Exerc.* 35(7) :1176-81. 73
- Chelly, M., S. Hermassi, R. Aouadi, R. Khalifa, D. Van, K. Chamari et R. Shephard. 2011, «Match analysis of elite adolescent team handball players», *J Strength Cond Res.* 25(9) :2410-2417. 3, 9, 112
- Chen, K. et D. Bassett. 2005, «The technology of accelerometry-based activity monitors : Current and future», *Med Sci Sports Exerc.* 37(11) : 490-500. 10, 11
- Chen, K., K. Janz, W. Zhu et R. Brychta. 2012, «Redefining the roles of sensors in objective physical activity monitoring», *Med Sci Sports Exerc.* 44(1) : 13-23. 10, 11, 12, 15
- Clarke, N., J. Farthing, S. Norris, B. Arnold et J. Lanovaz. 2013, «Quantification of training load in Canadian football : Application of session-RPE in collision-based team sports», *J Strength Cond Res.* 27(8) :2198-205. 75, 79, 80, 84, 145
- Clemente, F. M., B. Mendes, P. T. Nikolaidis, F. Calvete, S. Carriço et A. L. Owen. 2017, «Internal training load and its longitudinal relationship with seasonal player wellness in elite professional soccer», *Physiology & Behavior*, vol. 179, doi :10.1016/j.physbeh.2017.06.021, p. 262–267. 166
- Coleman, J. 1980, «Personality and stress in the shooting sports», *J Psychosom Res.* 24(5) :287-96. 101
- Colson, S. 2014, «Quantification des niveaux d'activite electromyographique des muscles agonistes et antagonistes lors de contractions musculaires isometriques, concentriques et excentriques», *Sciences & Motricite.* 85 : 93-104. 57
- Coombs, R. et G. Garbutt. 2002, «Developments in the use of the hamstring/quadriceps ratio for the assessment of muscle balance.», *J Sports Sci Med.* 141
- Cooper, K., B. Meyer, R. Blide, M. Pollock et L. Gibbons. 1977, «The important role of fitness determination and stress testing in predicting coronary incidence», *Ann N Y Acad Sci.* 301 :642-52. 14
- Corder, K., U. Ekelund, R. Steele, N. Wareham et S. Brage. 2008, «Assessment of physical activity in youth», *J Appl Physiol.* 105(3) : 977 - 87. 11
- Cormack, S., R. Newton, M. McGuigan et P. Cormie. 2008, «Neuromuscular and endocrine responses of elite players during an Australian rules football season», *Int J Sports Physiol Perform.* 3(4) :439-53. 108, 169

- Corssmit, E., J. Romijn et H. Sauerwein. 2001, «Review article : Regulation of glucose production with special attention to nonclassical regulatory mechanisms : A review», *Metabolism*. 50(7) :742-55. 95
- Corvino, M., A. Tessitore, C. Minganti et M. Sibila. 2014, «Effect of court dimensions on players external and internal load during small-sided handball games», *Journal of Sports Science and Medecine*. 13 : 297 - 303. 24, 48, 49
- Coutts, A. et R. Duffield. 2010, «Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports», *J Sci Med Sport*. 13(1) :133-5. 17
- Coutts, A., T. Kempton, C. Sullivan, J. Bilsborough, J. Cordy et E. Rampinini. 2015, «Metabolic power and energetic costs of professional Australian Football match-play», *J Sci Med Sport*. 18(2) :219-24. 10
- Coutts, A. et P. Reaburn. 2008, «Monitoring changes in rugby league players' perceived stress and recovery during intensified training», *Percept Mot Skills*. 106(3) :904-16. 81
- Coutts, A., P. Reaburn, T. Piva et A. Murphy. 2007, «Changes in Selected Biochemical, Muscular Strength, Power, and Endurance Measures during Deliberate Overreaching and Tapering in Rugby League Players», *Int J Sports Med*. 28(2) : 116 - 24. 33, 68, 75, 88, 89, 162
- Cresswell, S. et R. Eklund. 2006, «The convergent and discriminant validity of burnout measures in sport : A multi-trait/multi-method analysis», *J Sports Sci*. 24(2) : 209 - 220. 81
- Crewther, B., T. Lowe, R. Weatherby, N. Gill et J. Keogh. 2009, «Neuromuscular performance of elite rugby union players and relationships with salivary hormones», *J Strength Cond Res*. 23(7) :2046-53. 87, 145
- Croisier, J., B. Forthomme, M. Namurois, M. Vanderthommen et J. Crielaard. 2002, «Hamstrings muscle strain recurrence and strength performance disorders», *Am J Sports Med*. 30(2) : 199-203. 56, 60, 62, 64, 114, 121, 141
- Croisier, J., S. Ganteaume, J. Binet, M. Genty et J. Ferret. 2008, «Strength imbalances and prevention of hamstring injury in professional soccer players : A prospective study», *Am J Sports Med*. 36 (8) : 1469-75. 56, 61, 64, 114, 138
- Croisier, J., M. Malnati, L. Reichard, C. Peretz et Z. Dvir. 2007, «Quadriceps and hamstring isokinetic strength and electromyographic activity measured at different ranges of motion : A reproducibility study», *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 17,

- n° 4, doi :<https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2006.04.003>, p. 484–492, ISSN 1050-6411. 114, 138
- Cummins, C., H. Orr, R. Ans O'Connor et C. West. 2013, «Global positioning systems (gps) and microtechnology sensors in team sports : A systematic review», *Sports Medicine*, vol. 43, n° 10, p. 1025–1042. 17
- Cutsem, J. V., S. Marcora, K. D. Pauw, S. Bailey, R. Meeusen et B. Roelands. 2017, «The effects of mental fatigue on physical performance : A systematic review», *Sports Medicine*, vol. 47, n° 8, doi :[10.1007/s40279-016-0672-0](https://doi.org/10.1007/s40279-016-0672-0), p. 1569–1588. 171
- Da Silva, J., L. Guglielmo, L. Carminatti, O. De, N. Dittrich et C. Paton. 2011, «Validity and reliability of a new field test (Carminatti's test) for soccer players compared with laboratory-based measures», *J Sports Sci.* 29(15) :1621-8. 92
- Daniel, F., G. Breton, J. Garzon, A. Courtillon, A. Dainault et B. Kleinknecht. 1988, «Evaluation de l'insuffisance musculaire», in *Muscle et Reeducation Heuleu JN*, Simon L, editors. Masson : Paris, p. 56
- Dauty, M., P. Menu et A. Fouasson-Chailloux. 2017, «Cutoffs of isokinetic strength ratio and hamstring strain prediction in professional soccer playerscutoffs of isokinetic strength ratio and hamstring strain prediction in professional soccer players», *Scand J Med Sci Sports.* 64
- Davidson, C., L. Ganion, G. Gehlsen, B. Verhoestra, J. Roepke et T. Sevier. 1997, «Rat tendon morphologic and functional changes resulting from soft tissue mobilization», *Med Sci Sports Exerc.* 29(3) :313-9. 15
- Davies, G. 1992, «A compendium of isokinetics in clinical usage and rehabilitation techniques», *4th edition*. Onaska, Wisconsin, USA : S & S Publishers. 62
- Davies, G. J. et B. C. Heiderscheit. 1997, «Reliability of the Lido Linea Closed Kinetic Chain Isokinetic Dynamometer», *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, vol. 25, n° 2, doi :[10.2519/jospt.1997.25.2.133](https://doi.org/10.2519/jospt.1997.25.2.133), p. 133–136, ISSN 0190-6011, 1938-1344. 114
- Dawson, B., R. Hopkinson, B. Appleby, G. Stewart et C. Roberts. 2004, «Player movement patterns and game activities in the Australian Football League», *J Sci Med Sport.* 7(3) :278-91. 7
- Day, M., M. McGuigan, G. Brice et C. Foster. 2003, «Monitoring exercise intensity during resistance training using the session RPE scale», *J Strength Cond Res*, vol. 18, n° 2, p. 353–358. 75

- Delamarche, P., A. Gratas, J. Beillot, J. Dassonville, P. Rochcongar et Y. Lessard. 1987, «Extent of lactic anaerobic metabolism in handballers», *Int J Sports Med.* 8(1) : 55-59. 46, 47, 49, 53
- Dellal, A., C. Lago-Peñas, E. Rey, K. Chamari et E. Orhant. 2015, «The effects of a congested fixture period on physical performance, technical activity and injury rate during matches in a professional soccer team», *British Journal of Sports Medicine*, vol. 49, n° 6, doi :10.1136/bjsports-2012-091290, p. 390–394. 169
- Deng, P., Z. Lin, H. Xia et a. et. 1990, «A study of somatotypes of Chinese elite handball players», *J China Sports Sci Soc.* 10 :48-53. 35
- Denot-Ledunois, S. et E. Fossier. 1994, «Le rapport ischio-jambiers-quadriceps en isocinétisme : concentrique ou excentrique?», *Science & Sports*, vol. 9, n° 3, doi :10.1016/s0765-1597(05)80277-1, p. 161–163. 138
- Deutsch, M., G. Kearney et N. Rehrer. 2007, «Time - motion analysis of professional rugby union players during match-play», *J Sports Sci.* 15;25(4) :461-72. 5
- Devesa, J., L. Lima et J. A. Tresguerres. 1992, «Neuroendocrine control of growth hormone secretion in humans», *Trends Endocrinol Metab*, vol. 3, n° 5, p. 175–183. 92
- Dhein, S., K. van et O. Brodde. 2001, «Muscarinic receptors in the mammalian heart», *Pharmacol Res.* 44(3) :161-82. 98
- Di Prampero, P., S. Fusi, L. Sepulcri, J. Morin, A. Belli et G. Antonutto. 2005, «Sprint running : A new energetic approach», *J Exp Biol.* 208(14) :2809-16. 31
- Dias, R., A. Frollini, D. Brunelli, A. Yamada, R. Leite, R. Simoes, G. Salles, D. Trevisan, I. Pellegrinotti, M. de Castro Cesar, S. Alves, R. Verlengia, J. Borin, J. Prestes et C. Cavaglieri. 2011, «Immune parameters, symptoms of upper respiratory tract infections, and training load indicators in volleyball athletes», *International Journal of General Medecine.* 4 : 837 - 844. 93
- Docherty, D. et B. Sporer. 2000, «A proposed model for examining the interference phenomenon between concurrent aerobic and strength training.», *Sports Med*, vol. 30, n° 6, p. 385–394. 136, 139
- Drew, M. et C. Finch. 2016, «The relationship between training load and injury, illness and soreness : A systematic and literature view», *SportsMedicine*, vol. 46, n° 6, p. 861–883. 71

- Dubois, R., T. Paillard, M. Lyons, O. Maurelli et P. J. 2017, «Running and metabolic demands of elite rugby union assessed using traditional, metabolic power and heart rate monitoring methods», *JSportsSciMed*, vol. 16, n° 1, p. 84–92. 31, 145, 161, 162, 163, 165, 173
- Duchateau, J. 1984, «Isométric or dynamic training : Differential effects on mechanical properties of a human muscle», *Journal of applied physiology*, vol. 56, n° 2, p. 296–301. 61
- Dudley, G. A. et R. Djamil. 1985, «Incompatibility of endurance- and strength-training modes of exercise», *Journal of Applied Physiology*, vol. 59, n° 5, doi :10.1152/jappl.1985.59.5.1446, p. 1446–1451. 137
- Duquenne, F., S. Botton, F. Peyret, D. Betaille et P. Willis. 2005, «Localisation et navigation par satellites», *Edition Hermes Lavoisier*. 336 pages. 15
- Durnin, J. et M. Rahaman. 1967, «The assessment of the amount of fat in the human body from measurements of skinfold thickness», *Brit J Nutr*. 21 : 681-89. 34, 124, 153
- Duthie, G., D. Pyne et S. Hooper. 2005, «Time motion analysis of 2001 and 2002 super 12 rugby», *J Sports Sci*. 23(5) :523-30. 5, 6, 34
- Dvir, Z. 2004, «Isokinetics : Muscle testing, interpretation and clinical applications», *Churchill Livingstone : Tel-Aviv*. 60, 62, 114, 138
- Dzedzej, A., W. Ignatiuk, J. Jaworska, T. Grzywacz, P. Lipińska, J. Antosiewicz, A. Korek et E. Ziemann. 2016, «The effect of the competitive season in professional basketball on inflammation and iron metabolism.», *Biology of sport*, vol. 33, doi :10.5604/20831862.1201811, p. 223–229, ISSN 0860-021X. 164
- Edgecomb, S. et K. Norton. 2006, «Comparison of global positioning and computer-based tracking systems for measuring player movement distance during Australian football», *J Sci Med Sport*. 9(1/2) : 25 - 32. 33
- Edgerton. 1976, «The biology of physical activity», *Houghton Mifflin Company, Boston*. 55
- Edmonds, R., S. WH et A. Leicht. 2013, «Effect of a training week on heart rate variability in elite youth rugby league players.», *Int J Sports Med*, vol. 34, n° 12, p. 1087–1092. 107
- Edwards, S. 1993, «The Heart Rate Monitor Book», *Sacramento, CA : Fleet Feet Press*. xiii, 75, 78, 84
- Ekin, A., M. Tekalp et R. Mehrotra. 2003, «Automatic soccer video analysis and summarization», *IEEE Transact Image process*. 12(7) : 796 - 807. 7

- El-Rabanny, A. 2002, «Introduction to gps : The global positioning system», *Norwood, MA : Artech House*. 16
- Eliakim, A., D. Nemet, S. Bar-Sela, Y. Higer et B. Falk. 2002, «Changes in circulating IGF-i and their correlation with self-assessment and fitness among elite athletes», *International Journal of Sports Medicine*, vol. 23, n° 8, doi :10.1055/s-2002-35544, p. 600–603. 165
- Elliott, B. et J. Adlerson. 2007, «Laboratory versus field testing in cricket bowling : A review of current and past practice in modelling techniques», *Sports Biomech*. 6 : 99 - 108. 33
- Elloumi, M., O. Ben, Z. Tabka, P. Van, O. Michaux et G. Lac. 2008, «Psychoendocrine and physical performance responses in male Tunisian rugby players during an international competitive season», *Aggress Behav*. 34(6) :623-32. x, 87, 88, 89, 93, 145
- Elloumi, M., E. El, M. Zaouali, F. Maso, E. Filaire, Z. Tabka et G. Lac. 2005, «IGFBP-3, a sensitive marker of physical training and overtraining», *Br J Sports Med*. 39(9) :604-10. 88, 92, 145, 165
- Elloumi, M., F. Maso, O. Michaux, A. Robert et G. Lac. 2003, «Behaviour of saliva cortisol I, testosterone (T) and the T/C ratio during a rugby match and during the post-competition recovery days», *Eur J Appl Physiol*. 90 : 23 - 28. 88
- Eniseler, N., C. Sahan, H. Vurgun et H. Mavi. 2012, «Isokinetic strength responses to season-long training and competition in turkish elite soccer players», *J Hum Kinet*, vol. 31, p. 159–168. 64, 65, 128, 137, 138, 139
- Esliger, D. et M. Tremblay. 2006, «Technical reliability assessment of three accelerometer models in a mechanical setup», *Med Sci Sports Exerc*. 38(12) :2173-81. 12
- Evenson, K., M. Goto et R. Furberg. 2015, «Systematic review of the validity and reliability of consumer-wearable activity trackers», *Int J Behav Nutr Phys Act*. Dec 18;12 :159. 19
- Favre-Juvin, A., P. Flore et M. Rousseaux-Blanchi. 2003, «Approche clinique du surentraînement», *SciSports*. 18(6) : 287 - 289. 81
- Feiring, D. C., T. S. Ellenbecker et G. L. Derscheid. 1990, «Test-retest reliability of the bio-dex isokinetic dynamometer», *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, vol. 11, n° 7, p. 298–300, ISSN 0190-6011. 114
- Fick, A. 1870, «Uber die messung des blutquantums in den herzven-trikeln», *Phys. Med. Ges*. 13

- Figuroa, P., N. Leite et R. Barros. 2006, «Tracking soccer players aiming their kinematical motion analysis», *Comput vision image understand.* 101 : 122 - 135. 7
- Filaire, E., X. Bernain, M. Sagnol et G. Lac. 2001, «Preliminary results on mood state, salivary testosterone :cortisol ratio and team performance in a professional soccer team», *European Journal of Applied Physiology*, vol. 86, n° 2, doi :10.1007/s004210100512, p. 179–184. 164
- Filaire, E., C. Dupuis, G. Galvaing, S. Aubreton, H. Laurent, R. Richard et M. Filaire. 2013, «Lung cancer : What are the links with oxidative stress, physical activity and nutrition», *Lung Cancer*, vol. 82, n° 3, p. 383–389. 91
- Finaud, J., V. Scislowski, G. Lac, D. Durand, H. Vidalin, A. Robert et E. Filaire. 2006, «Antioxidant status and oxidative stress in professional rugby players : Evolution throughout a season.», *Int J Sports Med*, vol. 27, n° 2, p. 87–93. 91
- Foretz, M., N. Taleux, B. Giguas, S. Horman, C. Beauloye, F. Andreeli, L. Bertrand et B. Viollet. 2006, «Regulation of energy metabolism by AMPK : A novel therapeutic approach for the treatment of metabolic and cardiovascular diseases.», *Med Sci*, vol. 22, n° 4, p. 381–388. 136
- Foster, C. 1998, «Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome», *Med Sci Sports Exerc.* 30(7) : 1164 - 1168. 76
- Foster, C., A. Crowe, E. Daines, M. Dumit, M. Green, S. Lettau, N. Thompson et J. Weymier. 1996, «Predicting functional capacity during treadmill testing independent of exercise protocol», *Med Sci Sports Exerc.* 28(6) :752-6. 75
- Foster, C., J. Florhaug, J. Franklin, L. Gottschall, L. Hrovatin, S. Parker, P. Doleshal et C. Dodge. 2001, «A new approach to monitoring exercise training», *J Strength Cond Res.* Feb;15(1) :109-15. xiii, 80, 85, 173
- Fousekis, K., E. Tsepis et V. G. 2010, «Lower limb strength in professional soccer players : Profile, asymmetry and training age.», *Sports Sci Med*, p. 364–373. 141
- Fox, S., J. Naughton et W. Haskell. 1971, «Physical activity and the prevention of coronary heart disease», *Ann Clin Res*, vol. 3, p. 404–432. 14
- Fradet, L., M. Botcazou, C. Durocher, A. Cretual, F. Multon, J. Prioux et P. Delamarche. 2004, «Do Handball throws always exhibit a proximal to distal segmental sequence?», *J Sports Sci*, vol. 22, p. 439–447. 140

- Frisch, A., A. Urhausen, R. Seil, J. Croisier, T. Windal et D. Theisen. 2011, «Association between preseason functional tests and injuries in youth football : A prospective follow-up.», *Scand J Med Sci Spor*, vol. 21, n° 6, p. 468–476. 115
- Froelicher, V., H. Brammell, G. Davis, I. Noguera, A. Stewart et M. Lancaster. 1974, «A comparison of three maximal treadmill exercise protocols.», *J Appl Physiol*, vol. 36, n° 6, p. 720–725. 43
- Fruin, M. et J. Rankin. 2004, «Validity of a multi-sensor armband in estimating rest and exercise energy expenditure», *Med Sci Sports Exerc*. 36(6) :1063-9. 18
- Fry, R. W., A. Morton, P. Garcia-Webb et D. Keast. 1991, «Monitoring exercise stress by changes in metabolic and hormonal responses over a 24-h period», *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, vol. 63, n° 3, p. 228–34. 87, 144
- Fyfe, J. J., D. J. Bishop et N. K. Stepto. 2014, «Interference between concurrent resistance and endurance exercise : Molecular bases and the role of individual training variables.», *Sports Med*, vol. 44, p. 743–762. 136
- Gabbett, T. 2005, «Changes in physiological and anthropometric characteristics of rugby league players during a competitive season», *J Strength Cond Res*. 19(2) :400-8. 43, 169
- Gabbett, T. 2016, «The training-injury prevention paradox : Should athlete be training smarter and harder.», *British Journal of Sports Medicine*, p. 1–9. 144, 167
- Gabbett, T. et N. Domrow. 2007, «Relationships between training load, injury, and fitness in sub-elite collision sport athletes», *J Sports Sci*. 25(13) :1507-19. 84
- Gabbett, T. et D. Jenkins. 2011, «Relationship between training load and injury in professional rugby league players», *J Sci Med Sport*. 14(3) :204-9. 84
- Gabbett, T., D. Jenkins et B. Abernethy. 2012, «Physical demands of professional rugby league training and competition using microtechnology», *J Sci Med Sport*. 15(1) : 80-6. 16
- Gamelin, F., S. Berthoin et L. Bosquet. 2006, «Validity of the polar S810 heart rate monitor to measure R-R intervals at rest», *Med Sci Sports Exerc*. 38(5) :887-93. 12
- Garcia Cuesta, J. 1983, «Elite Athlete : Sports Medicine Programme.», *Sport Medicine Council*. 21, 28
- Gastin, P., D. Meyer et D. Robinson. 2013, «Perceptions of wellness to monitor adaptive responses to training and competition in elite Australian football», *J Strength Cond Res*. 27(9) :2518-26. 84

- Gaviglio, C., B. Crewther, L. Kilduff, K. Stokes et C. Cook. 2014, «Relationship between pre-game concentrations of free testosterone and outcome in rugby union», *Int J Sports Physiol Perform.* 9(2) :324-31. 87, 145
- Ghobadi, H., H. Rajabi, B. Farzad, M. Bayati et I. Jeffreys. 2013, «Anthropometry of world-class elite handball players according to the playing position : Reports from Men's Handball World Championship 2013», *Journal of Human Kinetics.* Volume 39/2013, 213 - 220. 34, 35, 36, 39
- Gomez-Piriz, P., P. Jimenez-Reyes et C. Ruiz-Ruiz. 2011, «Relation between total body load and session rating of perceived exertion in professional soccer players», *J Strength Cond Res.* 25(8) :2100-3. 17, 33
- Gonzalez-Boto, R., A. Salguero, C. Tuero, J. Gonzalez-Gallego et M. S. 2008, «Monitoring the effects of training load changes on stress and recovery in swimmers», *J Physiol Biochem*, vol. 64, n° 1, p. 18–26. 145
- González-Ravé, J., D. Juárez, J. Rubio-Arias, V. Clemente-Suarez, M.-V. M et J. Abian-Vice. 2014, «Isokinetic leg strength and power in elite handball players», *J Hum Kinet*, vol. 8, n° 41, p. 227–233. 66, 67, 114, 140
- Gorce-Dupuy, A., C. Vela, S. Badiou, A. Bargnoux, C. Josse, N. Roagna, M. Delage, F. Michel, M. Vernet, D. Destizons et J. Cristol. 2012, «Antioxidant and oligonutrient status, distribution of amino acids, muscle damage, inflammation, and evaluation of renal function in elite rugby players», *Clin Chem Lab Med.* 50(10) :1777-89. 87
- Gorostiaga, E., C. Granados, J. Ibanez, J. Gonzales-Badillo et M. Izquierdo. 2006, «Effects of an entire season on physical fitness changes in elite male handball players», *Med Sci Sports.* Ex 38(2) : 357 - 366. 2, 4, 33, 43, 52, 63, 64, 85, 112, 115, 128, 144, 145, 161, 162, 163
- Gorostiaga, E., C. Granados, J. Ibanez et M. Izquierdo. 2005, «Differences in physical fitness and throwing velocity among elite and amateur male handball players», *Int J Sports Med.* 26(3) :225-32. 37, 63, 114
- Gorostiaga, E. M., C. Granados, J. Ibanez et M. Izquierdo. 2004, «Differences in physical fitness and throwing velocity among elite and amateur male handball players.», *Int J Sports Med*, vol. 25, p. 1–8. 35
- Gozal, D., P. Thiriet, J. Cottet-Emard, D. Wouassi, E. Bitanga, A. Geysant, J. Pequignot et M. Sagnol. 1997, «Glucose administration before exercise modulates catecholaminergic responses in glycogen-depleted subjects», *J Appl Physiol.* V82(1) :248-56. 95

- Granados, C., M. Izquierdo, J. Ibanez et M. Ruesta. 2008, «Effects of an entire season on physical fitness in elite female handball players», *Med Sci Sport Exer*, vol. 40, n° 2, p. 351–361. 4, 33, 115, 128
- Grappe, F. 2012, «Cyclisme et Optimisation de la Performance», *Edition De Boeck, 2eme edition, Collection Science et pratique du Sport*. Paris, 604 pages. 51, 80
- Hakkinen, K. et P. Komi. 1981, «Effect of différent combined concentric and eccentric muscle work regimens on maximal strenth development», *Journal of Human Movement Studies*, vol. 7, p. 33–34. 61, 139
- Halson, S. 2014, «Monitoring training load to understand fatigue in athletes», *Sports Med*, vol. 44, p. 139–147. 69, 71, 144, 168
- Halson, S., M. Bridge, R. Meeusen, B. Busschaert, M. Gleeson, D. Jones et A. Jeukendrup. 2002, «Time course of performance changes and fatigue markers during intensified training in trained cyclists», *J Appl Physiol (1985)*. 93(3) :947-56. 81
- Halson, S., G. Lancaster, A. Jeukendrup et M. Gleeson. 2003, «Immunological responses to overreaching in cyclists», *Med Sci Sports Exerc*. 35 : 854 - 861. 69
- Harries, S., D. Lubans et R. Callister. 2012, «Resistance training to improve power and sports performance in adolescent athletes : A systematic review and meta-analysis», *J Sci Med Sport*. 15(6) :532-40. 66
- Hartmann, U. et J. Mester. 2000, «Training and overtraining markers in selected sport events», *Med Sci Sports Exerc*. 32 : 209 - 215. 88
- Hartwig, T., G. Naughton et J. Searl. 2008, «Defining the volume and intensity of sport participation in adolescent rugby union players», *Int J Sports Physiol Perform*. 3(1) :94-106. 81
- Hartwig, T., G. Naughton et J. Searl. 2011, «Motion analyses of adolescent rugby union players : A comparison of training and game demands», *J Strength Cond Res*. 25(4) :966-72. 16
- Hasan, A., J. Rahaman, N. Cable et T. Reilly. 2008, «Anthropometric profile of elite male handball players in Asian», *Biology of sport*. 24(1) : 3 - 12,. 20, 34, 37
- Haugen, T., E. Tonnessen et S. Seiler. 2016, «Physical and physiological characteristics of male handball players : Influence of playing position and competitive level», *J Sports Med Phys Fitness*. 56(1-2) : 19-26. 63, 64

- Hayes, P. et M. Quinn. 2009, «A mathematical model for quantifying training», *Eur J Appl Physiol*, vol. 106, n° 6, p. 839–847. 75
- Hedelin, R., U. Wiklund, P. Bjerle et K. Henriksson-Larsen. 2000, «Cardiac autonomic imbalance in an overtrained athlete», . 105
- Hendelman, D., K. Miller, C. Baggett, E. Debold et P. Freedson. 2000, «Validity of accelerometry for the assessment of moderate intensity physical activity in the field», *Med Sci Sports Exerc.* 32(9 Suppl) :S442-9. 11
- Herman, L., C. Foster, M. Maher, R. Mikat et J. Porcari. 2006, «Validity and reliability of the session rPe method for monitoring exercise training intensity», *South African Journal of Sports Medicine*, vol. 18, n° 1, p. 14–18. 75
- Hermansen, L. et B. Saltin. 1969, «Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle exercise.», *J Appl Physiol.*, vol. 26, n° 1, p. 31–37. 43
- Hermassi, S., C. Castagna, H. Mohamed, Y. Hachana et K. Chamari. 2010, «Direct validity of the Yo-Yo intermittent recovery test in young team handball players», *Nat Strength and Condit Association.* 24(2) : 465 - 470. 164
- Hill, A. V. 1938, «The Heat of Shortening and the Dynamic Constants of Muscle», *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, vol. 126, n° 843, p. 136–195, ISSN 00804649. 58
- Hislop, H. et J. Perrine. 1967, «The isokinetic concept of exercise», *Phys Ther.* 47(2) :114-7. 60, 61
- Hoffman, J. R., A. C. Fry, R. Howard, C. M. Maresh et W. J. Kraemer. 1991, «Strength, Speed and Endurance Changes During the Course of a Division I Basketball Season », *Journal of Strength and Conditioning Research*, vol. 5, n° 3, doi :10.1519/00124278-199108000-00006, p. 144–149, ISSN 1064-8011. 128
- Holm, I., M. A. Fosdahl, A. Friis, M. A. Risberg, G. Myklebust et H. Steen. 2004, «Effect of neuromuscular training on proprioception, balance, muscle strength, and lower limb function in female team handball players.», *Clin J Sport Med*, vol. 14, n° 2. 114, 140, 163
- Hooper, S., L. Mackinnon et S. Hanrahan. 1997, «Mood states as an indication of staleness and recovery», *International Journal of Sport Psychology*, vol. 28, p. 1–12. 85
- Hooper, S., T. MacKinnon, A. Howard, R. Gordon et A. Bachmann. 1995, «Markers for monitoring overtraining and recovery», *Med Sci Sports Exerc*, vol. 27, n° 1, p. 106–112. 81, 83, 85, 108, 153

- Hooper, S. L., L. T. Mackinnon et A. Howard. 1999, «Physiological and psychometric variables for monitoring recovery during tapering for major competition.», *Medicine and science in sports and exercise*, vol. 31, p. 1205–1210, ISSN 0195-9131. 164
- Hopkins, W. G., S. W. Marshall, A. M. Batterham et J. Hanin. 2009, «Progressive Statistics for Studies in Sports Medicine and Exercise Science :», *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 41, n° 1, doi :10.1249/MSS.0b013e31818cb278, p. 3–13, ISSN 0195-9131. 124, 132, 155
- Houle, M. et G. Billman. 1999, «Low-frequency component of the heart rate variability spectrum : A poor marker of sympathetic activity», *Am J Physiol*. 276(1 Pt 2) :H215-23. 101
- Hussain, M., O. Schmitz, J. Jorgensen, J. Christiansen, J. Weeke, C. Schmid et E. Froesch. 1996, «Insulin-like growth factor I alters peripheral thyroid hormone metabolism in humans : Comparison with growth hormone.», *Eur J Endocrinol*, vol. 134, n° 5, p. 563–567. 92
- Impellizzari, F., M. Bizzini, K. Desbrosses, N. Babault et U. Munzinger. 2008, «Reliability of isokinetic strength imbalance ratios measured using the cybex norm dynamometer», *Clin Physiol Funct Imaging*, vol. 28, n° 2, p. 113–119. 62
- Impellizzeri, F., E. Rampinini, A. Coutts, A. Sassi et S. Marcora. 2004, «Use of RPE-based training load in soccer», vol. 36, p. 1042–7. 77
- Islegen, C. et N. Akgun. 1988, «Effects of 6 weeks pre-seasonal training on physical fitness among soccer players», *In : Reilly, T, Lees, A, Davids, K, and Murphy, WJ. Science and football II. London : E & FN Spon.* 115
- Issurin, V. 2008, «Block periodization versus traditional training theory : a review.», *The Journal of sports medicine and physical fitness*, vol. 48, p. 65–75, ISSN 0022-4707. 162, 168
- Issurin, V. B. 2010, «New horizons for the methodology and physiology of training periodization.», *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, vol. 40, doi :10.2165/11319770-000000000-00000, p. 189–206, ISSN 1179-2035. 168
- Jalife, J. et D. Mickaels. 1994, «Neural control of sinoatrial pacemaker activity», *Vagal of the heart : Experimental basis and clinical implications.* Armonk Futura 173-205. 98
- Jennings, D., S. Cormack, A. Coutts, L. Boyd et R. Aughey. 2010, «The validity and reliability of GPS units for measuring distance in team sport specific running patterns», *Int J Sports Physiol Perform*, vol. 5, n° 3, p. 328–341. 71

- Jidovtseff, B. 2006, *Mise Au Point d'un Dynamomètre Spécifique de La Puissance Musculaire.*, thèse de doctorat, Université de Liège. Faculté de médecine. 58
- Jidovtseff, B., J. Croisier, B. Mordant et J. Crielaard. 2005, «Profil isocinétique des muscles fléchisseurs et extenseurs du genou dans une population d'athlètes sauteurs», *Sci Sports*, vol. 20, p. 304–307. 62
- Johnston, R., T. Gabbett et D. Jenkins. 2013, «Influence of an intensified competition on fatigue and match performance in junior rugby league players», *J Sci Med Sport*. 16(5) :460-5. 84, 87, 169
- Johnston, R., M. Watsford, M. Pine, R. Spurrs, A. Murphy et E. Pruyn. 2012, «The validity and reliability of 5-Hz global positioning system units measure team sport movement demands», *J Stren Cond Res*. 26(3) : 758 -65. 17
- Kamen, G. et G. Caldwell. 1996, «Physiology and interpretation of the electromyogram», *J Clin Neurophysiol*. 13(5) :366-84. 100
- Kannus, P. 1994, «Isokinetic evaluation of muscular performance : Implications for muscle testing and rehabilitation», *Int J Sport Med*, vol. 15, p. 11–18. 60, 64, 114, 138
- Karcher, C. et M. Buchheit. 2014, «On-court demands of elite handball, with special reference to playing positions», *Sports Med*. 44(6) :797-814. 3, 21, 22, 31, 54, 55, 66, 112, 114, 137, 164, 172
- Karvonen, J., J. Chwalbinska-Moneta et S. Saynajakangas. 1984, «Comparison of heart rate measured by ECG and microcomputer», 12(6) :65-69. 12
- Kavanagh, J. et H. Menz. 2008, «Accelerometry : A technique for quantifying movement patterns during walking», *Gait Posture*. 28(1) : 1 - 15. 11
- Kellmann, M. et K. Kallus. 2001, «Recovery-stress questionnaire for athletes : User manual. champaign», *Human Kinetics*. 81
- Kempton, T., A. Sirotic, M. Cameron et A. Coutts. 2013, «Match-related fatigue reduces physical and technical performance during elite rugby league match-play : A case study», *J Sports Sci*. 31(16) :1770-80. 71
- Kentta, G. et P. Hassmen. 1998, «Overtraining and recovery», *Sports Med*, vol. 26, n° 1, p. 1–16. 84
- Kerkour, K., M. Barthe, J. Meier et C. Gobelet. 1987, «[CITATION] Force musculaire maximale isocinétique, extenseurs et flechisseurs sagittaux du genou- Ann», *Kinesither*. 120

- Kerr, J., S. Duncan et J. Schipperijn. 2011, «Using global positioning systems in health research : A practical approach to data collection and processing», *Am J Prev Med.* Nov;41(5) :532-40. 16
- Khaled, S., J. Brun, A. Wagner, J. Mercier, J. Bringer et C. Prefaut. 1988, «Increase blood viscosity in iron-depleted elite athletes», *Clin Hemorheol Microcirc*, vol. 18, n° 4, p. 309–318. 93
- Khosla, T. 1983, «Sport for tall», *Br Med J (Clin Res Ed)*. 10; 287(6394) :736-8. 34
- Kleiger, R., P. Stein, M. Bosner et J. Rottman. 1992, «Time domain measurements of heart rate variability», *Cardiol Clin*. 10(3) :487-98. 100, 104
- Knapik, J. J. et M. U. Ramos. 1980, «Isokinetic and isometric torque relationships in the human body», *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 61, n° 2, p. 64–67, ISSN 0003-9993. 138
- KokouNouatin, B., P. Gouthon, P. HoundjoviDansou, J. Falola, F. Messan, D. Amoussou-Guenou, I. Niganand et B. AffidehomeTonon. 2014, «Comparing physical capacities and handball match data among elite back and front players in southern-republic of Benin», *Int J Curr Res*. 6(5) : 6675-80. 63
- Kong, P. W. et S. F. Burns. 2010, «Bilateral difference in hamstrings to quadriceps ratio in healthy males and females», *Physical Therapy in Sport*, vol. 11, n° 1, doi :10.1016/j.ptsp.2009.09.004, p. 12–17. 138
- Konzag, I. et C. Schacke. 1968, «Zur Physischen belastung im hallenhandballspiel», *Theorie und praxis der körperkultur*. 17 : 875-882. 21, 28
- Kowalewski, M. et M. Urban. 2004, «Short- and long-term reproducibility of autonomic measures in supine and standing positions», *Clin Sci (Lond)*. 106(1) :61-6. 101
- Koziris, L., R. Hickson, R. Chatterton, R. Groseth, J. Christie, D. Goldflies et T. Unterman. 1999, «Serum levels of total and free IGF-I and IGFBP-3 are increased and maintained in long-term training», *J Appl Physiol*, vol. 86, n° 4, p. 1436–1442. 92
- Kraemer, W., B. Aguilera, M. Terada, R. Newton, J. Lynch, G. Rosendaal, J. McBride, S. Gordon et K. Häkkinen. 1995, «Responses of IGF-I to endogenous increases in growth hormone after heavy-resistance exercise», *J Appl Physiol*, vol. 79, n° 4, p. 1310–1315. 92
- Kraemer, W. J., D. N. French, N. J. Paxton, K. Häkkinen, Jeff S. Volek, W. J. Sebastianelli, M. Putukian, R. U. Newton, M. R. Rubin, A. L. Gómez, J. D. Vescovi, N. A. Ratamess, S. J.

- Fleck, J. M. Lynch et H. G. Knuttgen. 2004, «Changes in exercise performance and hormonal concentrations over a big ten soccer season in starters and nonstarters», *Journal of Strength and Conditioning Research*, vol. 18, n° 1, p. 121–128, ISSN 1064-8011. 128
- Kruger, K., C. Pilat, K. Ueckert, T. Frech et F. Mooren. 2013, «Physical performance profile of handball players is related to playing position and playing class», *J Strength Cond Res*. 28(1)/117 - 125. 3, 34, 41, 46, 48, 52, 63, 112
- Kustrup, P., M. Mohr, A. Steensberg, J. Bencke, M. Kjae et J. Bangsbo. 2006, «Muscle and blood metabolites during a soccer game : Implications for sprint performance», *Medicine Science in Sports and Exercise*, vol. 38, n° 6, p. 1165–1174. 53
- Lachman, A. et C. Prefaut. 1994, «Guide de réalisation et d'interprétation des épreuves d'effort en pneumologie.», *Réalisation du groupe ALVEOLE. Paris : Boehringer Ingelheim France*. 43
- Lacome, M., J. Piscione, J.-P. Hager et M. Bourdin. 2014, «A new approach to quantifying physical demand in rugby union», *Journal of Sports Sciences*. 5, 7
- Larsson, P. 2003, «Global positioning system and sport-specific testing», *Sports Med*. 33(15) :1093-101. 15
- Le Faucheur, A., P. de Mullenheim et G. Mahe. 2015, «Six minutes walk is a better outcome measure than treadmill walking tests in therapeutic trials of patients with peripheral artery disease», *Circulation*. 131(15) :e406. 16
- Le Meur, Y., A. Pichon, L. Schaal, K and Schmitt, L. Louis, J. Gueneron, P. Vidal et C. Hauswirth. 2013, «Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes», *Med Sci Sports Exerc*. 107, 145
- Leger, L. et J. Lambert. 1982, «A maximal multistage 20-m shuttle run test to predict VO2 max», vol. 49, p. 1–12. 44, 123, 152
- Leger, L. et M. Thivierge. 1988, «Heart Rate Monitors : Validity, Stability, and Functionality», *Phys Sportsmed*. 16(5) :143-51. 44
- Legros, J., M. Anseau et M. Timsit-Berthier. 1993, «Neurohypophyseal peptides and psychiatric diseases», *Regul Pept*, vol. 45, n° 1;2, p. 133–138. 81
- Lehmann, M., C. Foster, H. Dickhuth et U. Gastmann. 1998, «Autonomic imbalance hypothesis and overtraining syndrome», *Med Sci Sports Exerc*. 30(7) :1140-5. 69
- Leroux, J., P. Codine, E. Thomas, M. Pocholle, D. Mailhe et F. Blotman. 1994, «Isokinetic evaluation of rotational strength in normal shoulders and shoulders with impingement syndrome», *Clin Orthop Relat Res*. (304) :108-15. 120

- Levet, B. et A. Thevenon. 1991, «Principes mecaniques des appareils de reeducation isocinetiques - Isocinetisme et Medecine de Reeducation», . 61
- Lindsay, A., J. Lewis, N. Gill, S. Gieseg et N. Draper. 2015, «Immunity, inflammatory and psychophysiological stress response during a competition of professional rugby union.», *Pteridines*, vol. 26, n° 4, p. 153–160. 87, 169
- Lombardi, F., A. Colombo, S. Belletti et D. Tarricone. 2001, «The autonomic nervous system in myocardial infarction», *Italian Heart Journal*. 2(8) : 865-870. 105
- Los Arcos, A., R. Martínez-Santos, J. Yanci, J. Martín et C. Castagna. 2014, «Variability of objective and subjective intensities during ball drills in youth soccer players», *J Strength Cond Res*, vol. 28, n° 3, p. 752–757. 76
- Lowe, S. et G. O'Leighin. 2014, «Monitoring human health behaviour in one's living environment : A technological review», *Med Eng Phys*. 36(2) :147-68. 10
- Lucia, A., J. Hoyos, A. Santalla, C. Earnest et L. Chicharro. 2003, «Tour de France versus Vuelta a Espana : Which Is Harder?», *Medicine and science in sports and exercise*, vol. 35, p. 872–8. 78
- Luig, P., L. Manchado, J. Pers, M. Perse, M. Kristan et I. Schander. 2008, «Motion characteristics according to playing positions in international men's team handball», *Communication to the Annual Congress of the European College of Sport Science, Estoril*. 3, 9, 21, 23, 28, 52, 112
- Macutkiewicz, D. et C. Sunderland. 2011, «The use of GPS to evaluate activity profiles of elite women hockey players during match-play», *J Sports Sci*. 29(9) :967-73. 19
- Malone, J. J., R. D. Michele, R. Morgans, D. Burgess, J. P. Morton et B. Drust. 2015, «Seasonal training-load quantification in elite english premier league soccer players», *International Journal of Sports Physiology and Performance*, vol. 10, n° 4, doi :10.1123/ijsp.2014-0352, p. 489–497. 144
- Manchado, C., J. Tortosa-Martinez, H. Vila, C. Ferragut et P. Platen. 2013, «Performance factors in women's team handball : Physical and physiological aspects-a review», *J Strength Cond Res*. 27(6) :1708-19. 3
- Manetta, J., J. Brun, L. Maimoun, O. Galy, O. Coste, F. Maso, J. Raibaut, C. Benezis, G. Lac et J. Mercier. 2002, «Carbohydrate dependence during hard-intensity exercise in trained cyclists in the competitive season : Importance of training status», *Int J Sports Med*, vol. 23, n° 7, p. 516–523. 93

- Manzi, V., S. D'Ottavio, F. Impellizzeri, A. Chaouachi, K. Chamari et C. Castagna. 2010, «Profile of weekly training load in elite male professional basketball players», *J Strength Cond Res.* 24(5) :1399-406. 69, 173
- Marcora, S. M., W. Staiano et V. Manning. 2009, «Mental fatigue impairs physical performance in humans», *Journal of Applied Physiology*, vol. 106, n° 3, doi :10.1152/jappphysiol.91324.2008, p. 857–864. 171
- Marin, D., S. Dos, A. Bolin, B. Guerra, E. Hatanaka et R. Otton. 2011, «Cytokines and oxidative stress status following a handball game in elite male players», *Oxid Med Cell L.* 93
- Marques, A. et J. Gonzalez-Badillo. 2006, «In season resistance training and detraining in professional team handball players», *Journal Strength and Cond Research.* 20(3) : 563 - 571. 4, 37, 46, 52, 63, 128, 136
- Martin, D. 1990, «Trainingslehre : Kursbuch für die Sporttheorie in der Schule», *Wiesbaden : Limpert.* 22, 86
- Maso, F., G. Lac et J. Brun. 2005, «Analyse et interprétation du questionnaire de la Société française de médecine du sport pour la détection de signes précoces de surentraînement : Étude multicentrique», *Science et Sports.* 20 : 12-20. 81
- Maso, F., G. Lac, E. Filaire, O. Michaux et A. Robert. 2004, «Salivary testosterone and cortisol in rugby players : Correlation with psychological overtraining items», *Br J Sports Med*, vol. 38, n° 3, p. 260–263. 87
- Massuca, L. et I. Fragoso. 2015, «Morphological characteristics of adult male handball players considering five levels of performance and playing position», *Coll Antropol.* 39(1) :109-18. 35, 63
- Massuca, L., I. Fragoso et J. Teles. 2013, «Attributes of top elite team-handball players», *J Strength Cond Res.* 3
- Matveiev, L. 1980, *Paris Les Bases de l'entraînement.* 68, 162
- Maurelli, O., P. L. Bernard, R. Dubois, S. Ahmaidi et J. Prioux. 2017, «Effects of pre-competitive preparation period on the isokinetic muscular characteristics in world class handball players», *Journal of Strength and Conditioning Research*, doi :10.1519/jsc.0000000000002199, p. 1. 161
- Mayhew, T. et J. Rothstein. 1985, «Measurement of muscle performance with instruments in measurement in physical therapy», *Rothstein JM, Editor.* Churchill Livingstone : New York P 57-102. 56

- McBride, J., T. Triplett-McBride, A. Davie et R. Newton. 2002, «The Effect of Heavy- Vs. Light-Load Jump Squats on the Development of Strength, Power, and Speed», vol. 16, p. 75–82. 59
- McLaren, S., A. Smith, I. Spears et M. Weston. 2016, «A detailed quantification of differential ratings of perceived exertion during team sport training», *Journal of Sciences Med Sport*, vol. 20, n° 3, p. 290–295. 76, 77
- McLean, C. Y., D. Bristor, M. Hiller, S. L. Clarke, B. T. Schaar, C. B. Lowe, A. M. Wenger et G. Bejerano. 2010, «GREAT improves functional interpretation of cis-regulatory regions.», *Nat Biotechnol.* 108
- McLellan, C., D. Lovell et G. Gass. 2010, «Creatine kinase and endocrine responses of elite players pre, during, and post rugby league match play», *J Strength Cond Res.* 24(11) :2908-19. 87, 90
- McLellan, C., D. Lovell et G. Gass. 2011, «Markers of postmatch fatigue in professional Rugby League players», *J Strength Cond Res.* 25(4) :1030-9. 87
- McMahon, S. et D. Jenkins. 2002, «Factors affecting the rate of phosphocreatine resynthesis following intense exercise», *SportsMedicine*, vol. 32, n° 12, p. 761–784. 43
- McNair, D., M. Lorr et L. Droppleman. 1971, «Manual : Profile of mood states», *San Diego, Calif: Educational and industrial testing services.* 81
- Meeusen, R., M. Duclos, C. Foster, A. Fry, M. Gleeson, D. Nieman, J. Raglin, G. Rietjens, J. Steinacker et A. Urhausen. 2013, «Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome : Joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine», *Med Sci Sports Exerc.* 45(1) :186-205. 68, 69, 109
- Michalsik, L. 2004, «Analysis of working demands of Danish handball players. What's going on in the gym? Learning, teaching and research in physical education», *Denmark : Institute of Sports Science and Clinical Biomechanics, University of Southern Denmark.* Pp. S 321-330. 4, 48, 52
- Michalsik, L. 2011, «Technical activity profile and influence of body anthropometry in male elite team handball players», dans *European Handball Federation Scientific Conference*, European handball federation scientific conference 2011 - science and analytical expertise in handball. Proceedings of the first international conference on science in handball (pp 174-179) Vienna, Austria : EHF. 24, 31, 54

- Michalsik, L., P. Aagaard et K. Madsen. 2013, «Locomotion characteristics and match induced impairments in physical performance in male elite team handball players», *Int J Sports Med.* 34(7) : 590-9. ix, 21, 24, 29, 53, 114, 164, 172
- Michalsik, L., K. Madsen et P. Aagaard. 2014, «Match performance and physiological capacity of female elite team handball players», *Int J Sports Med.* 35(7) :595-607. 3, 112
- Michalsik, L., K. Madsen et P. Aagaard. 2015a, «Physiological capacity and physical testing in male elite team handball», *J Sports Med Phys Fitness*, vol. 55, n° 5, p. 415–429. 3, 4, 25, 114, 140, 172
- Michalsik, L., K. Madsen et P. Aagaard. 2015b, «Technical match characteristics and influence of body anthropometry on playing performance in male elite team handball», *J Strength Cond Res*, vol. 29, n° 2, p. 416–428. 3, 31, 42, 112, 163
- Michalsik, L., H. Sondergaard et M. Flynn. 2016, «Team handball match analysis by computer tracking from the men's european championships 2016», *21st Annual Congress of the European College of Sport Science, Vienna.* 3, 21, 26, 30
- Mikkelsen, E. et M. Olesen. 1976, «Handball 82-84 (Traening af skudstyrken)», *Trygg-Hansa, Stockholm.* 46, 48, 49, 53
- Millet, G., R. Candau, B. Barbier, T. Busso, J. Rouillon et J. Chatard. 2002, «Modelling the transfers of training effects on performance in elite triathletes», *International Journal of Sports Medicine*, vol. 23, p. 55–63. 73
- Mohamed, H., R. Veayens, S. Mathys, S. Multael, J. Lefevre, M. Lenoir et R. Philippaerts. 2009, «Anthropometric and performance measures for the development of a talent detection and identification model in youth handball», *J Sports Sci*, vol. 27, n° 3, p. 257–266. 32
- Møller, P., H. Wallin et L. E. Knudsen. 1996, «Oxidative stress associated with exercise, psychological stress and life-style factors», *Chemico-Biological Interactions*, vol. 102, n° 1, p. 17–36. 92
- Moncef, C., M. Said, N. Olfa et G. Dagbaji. 2012, «Influence of morphological characteristics on physical and physiological performances of Tunisian elite male handball players», *Asian Journal of Sports Medicine.* 3(2) : 74 - 80. 63
- Montoye, H. 1996, «Measuring physical activity and energy expenditure», *Human Kinetics Publishers.* 15

- Morin. 2015, *Conception d'un Système Informatique Ergonomique Pour Modéliser et Gérer l'entraînement : Application Au Volley-Ball Professionnel*, thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne, Amiens. 173
- Morin, S., S. Ahmaïdi et P. Lepretre. 2014, «Modeling of training effects : Review of various studies», *Science et Sports*. 68, 69, 72, 73, 83
- Morton, A., K. Joyce, S. Papalia, N. Carroll et K. Fitch. 1996, «Is salmeterol ergogenic?», *Clin J Sport Med*. 6(4) :220-5. 73, 77, 78
- Morton, R., J. Fitz-Clarke et E. Banister. 1990, «Modeling human performance in running.», *J Appl Physiol*, vol. 69, n° 3, p. 1171–1177. 73
- Mujika, I., T. Busso, L. Lacoste, F. Barale, A. Geysant et J. Chatard. 1996, «Modeled responses to training and taper in competitive swimmers», *Medecine and Sciences in Sports and Exercice*. 28(2), 251 - 258. xiii, 73, 75, 79
- Mujika, I., S. Halson, L. M. Burke, G. Balagué et D. Farrow. 2018, «An integrated, multi-factorial approach to periodization for optimal performance in individual and team sports», *International Journal of Sports Physiology and Performance*, vol. 13, n° 5, doi : 10.1123/ijsp.2018-0093, p. 538–561. 169
- Mujika, I. et S. Padilla. 2001, «Muscular characteristics of detraining in humans.», *Medicine and science in sports and exercise*, vol. 33, p. 1297–1303, ISSN 0195-9131. 162
- Murray, N. B., T. J. Gabbett, A. D. Townshend et P. Blanch. 2016, «Calculating acute :chronic workload ratios using exponentially weighted moving averages provides a more sensitive indicator of injury likelihood than rolling averages», *British Journal of Sports Medicine*, vol. 51, n° 9, doi :10.1136/bjsports-2016-097152, p. 749–754. 161
- Nachtigall, D., P. Nielsen, R. Fischer, R. Engelhardt et E. Gabbe. 1996, «Iron deficiency in distance runners. A reinvestigation using Fe-labelling and non-invasive liver iron quantification.», *Int J Sports Med*, vol. 17, n° 7, p. 473–479. 93
- Nader, G. 2006, «Concurrent strength and endurance training : From molecules to man.», *Med Sci Sport Exer*, vol. 38, n° 11, p. 1965–1970. 139
- Nakamura, F., L. Pereira, J. Moraes, R. Kobal, K. Kitamura et C. Abad. 2016, «Physical and Physiological Differences of Backs and Forwards From the Brazilian National Rugby Union Team», *J Sports Med Phys Fitness*. 107
- Newhouse, I. et D. Clement. 1988, «Iron status in athletes. An update.», *Sports Med*, vol. 5, n° 6, p. 337–352. 93

- Nicholas, J., A. Sapega, H. Kraus et J. Webb. 1978, «Factors influencing manual muscle tests in physical therapy», *J Bone Joint Surg Am.* 60(2) : 186-90. 56
- Nijijima, A. 1983, «Glucose-sensitive afferent nerve fibers in the liver and their role in food intake and blood glucose regulation», *J Auton Nerv Syst.* 9(1) :207-20. 95
- Nikolaidis, P. et J. Ingebrigsten. 2013, «Physical and physiological characteristics of elite male handball players from teams with a different ranking», *Journal of human Kinetics.* 38(3), 115 - 124. 4, 42, 63
- Nindl, B., J. Castellani, A. Young, J. Patton, M. Khosravi, A. Diamandi et S. Montain. 2003, «Differential responses of IGF-I molecular complexes to military operational field training», *J Appl Physiol*, vol. 95, n° 3, p. 1083–1089. 92
- Nunes, J. A., A. Moreira, B. T. Crewther, K. Nosaka, L. Viveiros et M. S. Aoki. 2014, «Monitoring training load, recovery-stress state, immune-endocrine responses, and physical performance in elite female basketball players during a periodized training program», *Journal of Strength and Conditioning Research*, vol. 28, n° 10, doi :10.1519/jsc.0000000000000499, p. 2973–2980. 144
- Orchard, J., J. Marsden et S. Lord. 1997, «Preseason hamstring muscle weakness associated with hamstring muscle injury in australian footballer», *Am J Sports Med*, vol. 25, p. 81–85. 64, 115
- Ormsbee, M. J. et P. J. Arciero. 2012, «Detraining increases body fat and weight and decreases v[combining dot above]o2peak and metabolic rate», *Journal of Strength and Conditioning Research*, vol. 26, n° 8, doi :10.1519/jsc.0b013e31823b874c, p. 2087–2095. 161
- Osgnach, C., S. Poser, R. Bernardini, R. Rinaldo et P. di. 2010, «Energy cost and metabolic power in elite soccer : A new match analysis approach», *Med Sci Sports Exerc.* 42(1) :170-8. 52
- Oxendale, C. L., C. Twist, M. Daniels et J. Highton. 2016, «The Relationship Between Match-Play Characteristics of Elite Rugby League and Indirect Markers of Muscle Damage», *Int J Sports Physiol Perform*, vol. 11, n° 4, p. 515–521. 90
- Pagani, M., F. Lombardi et S. Guzzetti. 1986, «Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog», *Circ Res.* 59 : 178-193. 100, 101
- Patton, J., M. Murphy et F. Frederick. 1985, «Maximal power outputs during the wingate anaerobic test», *Int J of Sports Med*, vol. 6, p. 82–85. 51

- Pedisic, Z. et A. Bauman. 2015, «Accelerometer-based measures in physical activity surveillance : Current practices and issues», *Br J Sports Med.* 49(4) :219-23. 12
- Pereira, T., E. Vilaprinyo, G. Belli, E. Herrero, B. Salvado, A. Sorribas, G. Altés et R. Alves. 2018, «Quantitative operating principles of yeast metabolism during adaptation to heat stress», *Cell Reports*, vol. 22, n° 9, doi :10.1016/j.celrep.2018.02.020, p. 2421–2430. 164
- Pers, J., M. Bon, S. Kovacic, M. Sibila et B. Dezman. 2002, «Observation and analysis of large-scale human motion», *Human Movement Science.* 21(2) : 295 - 311. 3, 4, 52, 112
- Pers, J. et S. Kovacic. 2000a, «Computer vision system for tracking players in sports games», *First International Workshop on Image and Signal Processing and Analysis.* Jun 14 - 15, Pula, IWISPA, 81 - 86. 8
- Pers, J. et S. Kovacic. 2000b, «A system for tracking players in sports games by computer vision», *Electrotechnical Rev.* 67(5) : 281 - 288. 8
- Perse, M., J. Pers, M. Kristan, G. Vuckovic et S. Kovacic. 2005, «Physics-based modelling of human motion using kalman filter and collision avoidance algorithm», *In 4th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis ISPA.* Pages 328-333, September. 8
- Persson, P. 1996, «Modulation of cardiovascular control mechanism and their interaction», *Phys. Rev A* 76 : 193-244. 100, 101
- Persson, P., H. Stauss, O. Chung, U. Wittmann et T. Unger. 1992, «Spectrum analysis of sympathetic nerve activity and blood pressure in conscious rats», *Am J Physiol.* 263 : 1348-1355. 101
- Pichot, V., E. Bourin, F. Roche, M. Garet, J. Gaspoz, D. Duverney, A. Antoniadis, J. Lacour et J. Barthelemy. 2002, «Quantification of cumulated physical fatigue at the workplace», *Pflugers.* 445(2) : 267 - 72. 105
- Pichot, V., F. Roche, J. Gaspoz, F. Enjolras, A. Antoniadis, P. Minini, F. Costes, T. Busso, J. Lacour et J. Barthelemy. 2000, «Relation between heart rate variability and training load in middle-distance runners», *Med Sci Sports Exerc.* 32(10) :1729-36. 107
- Pirnay, F. et J. Criellaard. 1979, «Mesure de la puissance anaérobie alactique», *Medecine du sport*, vol. 53, n° 13. 50
- Plasqui, G., A. Bonomi et K. Westerterp. 2013, «Daily physical activity assessment with accelerometers : New insights and validation studies», *Obes Rev.* 14(6) :451-62. 11

- Plews, D., P. Laursen, A. Kilding et M. Buchheit. 2013, «Evaluating training adaptation with heart rate measures : A methodological comparison», *Int J Sports Phys Perf.* 8(6) : 688-691. 107
- Pokan, R., G. Schwaberg, P. Hofmann, H. Eber, P. ands Toplak, R. Gaesser, F. Fruhwald, H. Pessenhofer et W. Klein. 1995, «Effects of treadmill exercise protocol with constant and ascending grade on leveling-off O₂ uptake and V_{O₂max.», *Inj J Sports Med*, vol. 16, p. 238–242. 43}
- Pomeranz, M., R. Macaulay et M. Caudill. 1985, «Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis», *Am J physiol.* 248 : 151-153. 100, 101, 154
- Pori, P. 2003, «Analysis of loading and effort of wing players in team handball», *Ljubljana : University of Ljubljana.* 52, 54
- Pori, P., S. Kovcic et M. Bon. 2009, «Various age category related differences in the volume and intensity of the large scale cyclic movement of male players in team handball», *Acta Univ Palacki Olomuc Gymnica.* 35(2) : 119-126. 25
- Povoas, S. 2009, *Estudo Do Jogo e Do Jogador de Andebol de Elite : Universidade Do Porto*, thèse de doctorat, Universidade do Porto. 34, 35, 48, 54, 66
- Povoas, S., A. Ascensao, J. Magalhaes, A. Seabra, P. Krustup, J. Soares et A. Rebelo. 2014, «Physiological demands of elite team handball with special reference to playing position», *Strength Cond Res.* 28(2) : 430 - 442. 3, 4, 25, 29, 42, 48, 49, 52, 112, 114, 140, 163, 172
- Povoas, S., A. Seabra, A. Ascensao, J. Magalhaes, J. Soares et A. Rebelo. 2012, «Physical and physiological demands of elite team handball», *J Strength Cond Res.* 26(12) : 3365-3375. 4, 24, 29, 31, 32, 33, 34, 38, 48, 52, 112, 114, 172
- Pritzlaff, C., L. Wideman, J. Weltman, R. Abbott, M. Gutgesell, M. Hartman, J. Veldhuis et A. Weltman. 1999, «Impact of acute exercise intensity on pulsatile growth hormone release in men», *J Appl Physiol*, vol. 87, n° 2, p. 498–504. 92
- Pumprla, J., K. Howorka, D. Groves, M. Chester et J. Nolan. 2002, «Functional assessment of heart rate variability : Physiological basis and practical applications», *Int J Cardiol.* 84(1) :1-14. 104, 105
- Rainham, D., D. Krewski, I. McDowell, M. Sawada et B. Liekens. 2008, «Development of a wearable global positioning system for place and health research», *Int J Health Geogr.* 25;7 :59. 18

- Ramadan, J. et A. Hassan. 1999, «Physiological profiles of Kuwait national team handball and soccer players», *Med Sci Sports Exerc.* 31(5) : S257. 37, 47, 49
- Rannou, F., J. Prioux, H. Zouhal, A. Gratas-Delamarche et P. Delamarche. 2001, «Physiological profile of handball players», *J Sports Med Phys Fitness.* 41(3) : 349 - 353. 37, 46, 47, 49, 53, 54
- Reid, M., R. Duffield et B. Dawson. 2008, «Quantification of the physiological and performance characteristics on on-court tennis drills», *Br J Sports Med.* 42 : 146 - 151. 33
- Reilly, T. et V. Thomas. 1976, «A motion analysis of work-rate in different positional roles in professional football match-play», Pp. 5
- Reilly, T. et V. Thomas. 1977, «Effects of a program of pre-season training on the fitness of soccer players.», *J Sport Med Phys Fit*, vol. 17, n° 4, p. 401–412. 115, 137
- Richter, E., N. Ruderman, H. Gavras et E. Belur. 1982, «Muscle glycogenolysis during exercise : Dual control by epinephrine and contractions», *Am J Physiol.* 242 : 25-32. 95
- Roberts, D. et D. Smith. 1990, «Serum ferritin values in elite speed and synchronized swimmers and speed skaters.», *The Journal of laboratory and clinical medicine*, vol. 116, p. 661–665, ISSN 0022-2143.
- Roberts, R., N. Callow, L. Hardy, D. Markland et J. Bringer. 2008, «Movement imagery ability : Development and assessment of a revised version of the vividness of movement imagery questionnaire», *J Sport Exerc Psychol.* 30(2) :200-21. 7
- Robinson, S. 1938, «Experimental studies of physical fitness in relation to age», *Arbeitsphys*, vol. 10, p. 18–323. 43
- Rochcongar, P. 2004, «Isokinetic thigh muscle strength in sports : A review», *Ann Readapt Med Phys.* 47(6) : 274-81. 122
- Rodriguez, D., A. Brown et P. Troped. 2005, «Portable global positioning units to complement accelerometry-based physical activity monitors», *Med Sci Sports Exerc.* 37(11 Suppl) :S572-81. 11
- Rogalski, B., B. Dawson, J. Heasman et T. Gabbett. 2013, «Training and game loads and injury risk in elite Australian footballers», *J Sci Med Sport.* 16(6) :499-503. 84
- Rosenfeld, R. G. et B. Bengtsson. 1994, «Effects of growth hormone and insulin-like growth factors on the central nervous system», *Acta Paediatr Supp*, vol. 406, n° 89–91. 92
- Sale, D. et D. Mac Dougall. 1981, «Specificity in strength training : A review for the coach and athlete», *Can J Appl Sport Sci*, vol. 6, n° 2, p. 87–92. 56

- Sale, D. G., J. D. MacDougall, I. Jacobs et S. Garner. 1990, «Interaction between concurrent strength and endurance training», *Journal of Applied Physiology*, vol. 68, n° 1, doi :10.1152/jappl.1990.68.1.260, p. 260–270. 137
- Saliba, L. et C. Hrysomallis. 2001, «Isokinetic strength related to jumping but not kicking performance of australian footballers.», *Journal of science and medicine in sport*, vol. 4, p. 336–347, ISSN 1440-2440. 143
- Saltin, B. 1964, «Circulatory response to submaximal and maximal exercise after thermal dehydration», *J Appl Physiol*, vol. 19, p. 1125–1132. 79
- Samozino, P., P. Edouard, S. Sangnier, M. Brughelli, P. Gimenez et J.-B. Morin. 2013, «Force-Velocity Profile : Imbalance Determination and Effect on Lower Limb Ballistic Performance», vol. 35. 59
- Samozino, P., N. Horvais et F. Hintzy. 2007, «Why Does Power Output Decrease at High Pedaling Rates during Sprint Cycling?», vol. 39, p. 680–7. 59
- Samozino, P., J.-B. Morin, F. Hintzy et A. Belli. 2008, «A simple method for measuring force, velocity and power output during squat jump», vol. 41, p. 2940–5. 58, 59
- Samozino, P., J.-B. Morin, F. Hintzy et A. Belli. 2010, «Jumping ability : A theoretical integrative approach», vol. 264, p. 11–8. 59
- Samozino, P., E. Rejc, P. Enrico Di Prampero, A. Belli et J.-B. Morin. 2011, «Optimal Force–Velocity Profile in Ballistic Movements—Altius», vol. 44, p. 313–22. 59
- Sanchis-Gomar, E., R. Alis, E. Rampinini, A. Bosio, D. Ferioli, A. L. Torre, J. Xu, V. Sansoni, S. Perego, M. Romagnoli et G. Lombardi. 2015, «Adropin and apelin fluctuations throughout a season in professional soccer players : Are they related with performance?», *Peptides*, vol. 70, doi :10.1016/j.peptides.2015.05.001, p. 32–36. 144
- Sargent, L. 1924, «Some observations on the sargent test of neuro- muscular efficiency», *American Physical Education Review*, vol. 29, p. 47–56. 57
- Saw, A., L. Main et P. Gatin. 2016, «Monitoring the athlete training response : Subjective self-reported measures trump commonly used objective measures : A systematic review», *Br J Sports Med*, vol. 50, n° 5, p. 281–291. 81
- Schelling, X., J. Calleja-González, L. Torres-Ronda et N. Terrados. 2015, «Using testosterone and cortisol as biomarker for training individualization in elite basketball : A 4-year follow-up study», *J Strength Cond Res*, vol. 29, n° 2, p. 368–378. 90, 164

- Schelling, X., L. Torres-Ronda, J. Calleja-González, N. Terrados et J. Mjaanes. 2014, «Creatine Kinase Responses 24-36 Hours After Elite Official Basketball Games. A 6-years Follow-up Study.», *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 46, n° 5, p. 924. xiii, 88, 90
- Schmitt, L., J. Regnard, D. Auguin et G. Millet. 2016, «Monitoring training and fatigue with heart rate variability : Case study in a swimming olympic champion.», *Journal of fitness research*, vol. 5, n° 3. 105, 145
- Schmitt, L., J. Regnard, M. Desmarests, F. Mauny, L. Mourot, J. Fouillot, N. Coulmy et G. Millet. 2013, «Fatigue shifts and scatters heart rate variability in elite endurance athletes», *PLoS One*. 12;8(8) :e71588. 104, 105, 153
- Schmitt, L., J. Regnard et G. Millet. 2015a, «Monitoring Fatigue Status with HRV Measures in Elite Athletes : An Avenue Beyond RMSSD?», *Front Physiol*. 19;6 :343. 107, 109, 145, 153, 167
- Schmitt, L., J. Regnard, A. Parmentier, F. Mauny, L. Mourot, N. Coulmy et G. Millet. 2015b, «Typology of "Fatigue" by Heart Rate Variability Analysis in Elite Nordic-skiers», *Int J Sports Med*. 36(12) :999-1007. 107
- Schneider, V., B. Arnold, K. Martin, D. Bell et P. Crocker. 1988, «Detraining effects in college football players during the competitive season», *J Strength Cond Res*, vol. 12, n° 1. 140, 163
- Schorer, J., S. Cobley, D. Busch, H. Brautigam et J. Baker. 2009, «Influences of competition level, gender, player nationality, career stage and playing position on relative age effects», *Scand J Med Sci Sports*. 19(5) :720-30. 46, 52
- Scott, B., R. Lockie, T. Knight, A. Clark et d. Janse. 2013a, «A comparison of methods to quantify the in-season training load of professional soccer players», *International Journal of Sports Physiology and performance*. 8, 195 - 202. 16, 33
- Scott, T., C. Black, J. Quinn et A. Coutts. 2013b, «Validity and reliability of the session-RPE method for quantifying training in Australian football : A comparison of the CR10 and CR100 scales», *J Strength Cond Res*. 27(1) :270-6. 84
- Seaward, B., R. Sleamaker, T. McAuliffe et J. Clapp. 1990, «The precision and accuracy of a portable heart rate monitor», *Biomed Instrum Technol*. 24(1) :37-41. 13
- Segal, K. 1996, «Use of bioelectrical impedance analysis measurements as an evaluation for participating in sports», *Am J Clin Nutr*. 57 (S) : 469-71. 34

- Segen, J. et S. Pingali. 1996, «A camera based system for tracking people in real time», *IEEE Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition ICPR*. 8
- Selye, H. 1975, *Le Stress de La Vie*. 68
- Sheldon, W. 1950, «The somatotype, the morphophenotype and the morphogenotype», *Cold Spring Harb Symp Quant Biol*. 15 : 373 :382. 35
- Shimizu, T. 1971, «Regulation of glycogen metabolism in the liver by autonomic nervous system; Activation of glycogen synthetase by vagal stimulation», *Biochim Biophys Acta*. 252 : 28-38. 97
- Sibila, M., D. Vuleta et P. Pori. 2004, «Position-related differences in volume and intensity of large-scale cyclic movements of male players in handball», *Kinesiology*. 36(1) : 58 - 68. 3, 4, 9, 22, 23, 28, 34, 48, 112, 144
- Silva, J., J. Magalhaes, A. Ascensao, A. Seabra et A. Rebelo. 2013, «Training status and match activity of professional soccer players throughout a season.», *J Strength Cond Res*, vol. 27, n° 1, p. 20–30. 140, 142, 163, 168
- Silva, J. R., J. F. Magalhaes, A. A. Ascensao, E. M. Oliveira, A. F. Seabra et R. A. N. 2011, «Individual match playing time during the season affects fitness related-parameters of male professional soccer players.», *J Strength Cond Res*, vol. 25, n° 10. 139
- Slattery, K., A. Coutts, W. Eru et D. Bentley. 2012, «Effect of training load on simulated team sport match performance», *Appl Physiol Nutr Metab*. 37 : 1 - 8. 92
- Snyder, A. 1998, «Overtraining and glycogen depletion hypothesis», *Med Sci Sports Exerc*, vol. 30, n° 7, p. 1146–50. 86
- Soligard, T., M. Schwellnus, J. Alonso, R. Bahr, B. Clarsen, H. Dijkstra, T. Gabbett, M. Gleeson, M. Häggglund, M. Hutchinson, C. Janse van Rensburg, K. Khan, R. Meeusen, J. Orchard, B. Pluim, M. Raftery, R. Budgett et L. Engebretsen. 2016, «How much is too much? (Part 1) International Olympic Committee consensus statement on load in sport and risk of injury.», *Br J Sports Med*, vol. 50, n° 17, p. 1030–1041. 68, 70
- Spiro, S. 1977, «Exercise testing in clinical medicine», *Br J Dis Chest*. 71(3) :145-72. 14
- Sporis, G., D. Vuleta, D. Vuleta et D. Milanovic. 2010, «Fitness profiling in handball : Physical and physiological characteristics of elite players», *Coll Antropol*. 34(3) : 1009 - 1014. 4, 34, 38, 47, 48
- Srhoj, V., M. Marinovic et N. Rogulj. 2002, «Position specific morphological characteristics of top level male handball players», *Coll Antropol*. 26(1) : 219 - 227. 34, 37

- Stagno, K., R. Thatcher et K. VanSomeren. 2007, «A modified TRIMP to quantify the in-season training load of team sport players», *J Sports Sci.* 25(6) :629-34. 78
- Steinacker, J., W. Lormes, S. Reissnecker et Y. Liu. 2004, «New aspects of the hormone and cytokine response to training», *Eur J Appl Physiol.* 91(4) :382-91. 92
- Stolen, T., K. Chamari, C. Castagna et U. Wisloff. 2005, «Physiology of soccer.», *Sports Med*, vol. 35. 141
- Stumpel, F. 1997, «Sensing by intrahepatic muscarinic nerves of a portal-arterial glucose concentration gradient as a signal for insulin-dependent glucose uptake in the perfused rat liver», *FEBS Lett.* 406 : 119-122. 97
- Suzuki, S., T. Sato, A. Maeda et Y. Takahashi. 2006, «Program design based on a mathematical model using rating of perceived exertion for an elite Japanese sprinter : A case study», *J Strength Cond Res*, vol. 20, p. 36–42. 84
- Taha, T. et S. Thomas. 2003, «Systems modelling of the relationship between training and performance», *Sports Med.* 33(14) :1061-73. 73, 74, 75
- Takarada, Y. 2003, «Evaluation of muscle damage after a rugby match with special reference to tackle play», *Br J Sports Med*, vol. 37, n° 5, p. 416–419. 87
- Taki, T., J. Hasegawa et T. Fukumura. 1996, «Development of motion analysis system for quantitative evaluation of teamwork in soccer games», dans *International Conference Image Processing*, IEEE. 3 : 815 - 818. 7
- Task Force. 1996, «Heart rate variability : Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use», *Circulation.* 93 : 1043-1065. x, 95, 98, 100, 102, 153
- Terrier, P. et Y. Schutz. 2005, «How useful is satellite positioning system (GPS) to track gait parameters?», *A review J Neuroeng Rehabil.* Sep 2;2 :28. 15
- Thorlund, J., L. Michalsik, K. Madsen et P. Aagaard. 2008, «Acute fatigue induced changes in muscle mechanical properties and neuromuscular activity in elite handball players following a handball match», *Scand Journal of Med and Scienc in Sports.* 18 : 462 - 472. 4, 27, 30, 31, 38, 49, 112, 114, 161
- Thorstensson, A., G. Grimby et K. and. 1976, «Force-velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles», *J Appl Physiol.* 40(1) : 12-6. 120, 141
- Tol, J. L., B. Hamilton, C. Eirale, P. Muxart, P. Jacobsen et R. Whiteley. 2014, «At return to play following hamstring injury the majority of professional football players have residual isokinetic deficits.», *Br J Sports Med*, vol. 48, n° 18, p. 1364–1369. 141

- Treiber, F., L. Musante, S. Hartdagan, H. Davis, M. Levy et W. Strong. 1989, «Validation of a heart rate monitor with children in laboratory and field settings», *Med Sci Sports Exerc.* 21(3) :338-42. 12
- Tremblay, M., S. CHU et R. Mureika. 1995, «Methodological and statistical considerations for exercise-related hormone evaluations», *Sports Med*, vol. 20, p. 90–108. 87
- Troped, P., M. Oliveira, C. Matthews, E. Cromley, S. Melly et B. Craig. 2008, «Prediction of activity mode with global positioning system and accelerometer data», *Med Sci Sports Exerc.* 40(5) :972-8. 11, 19
- Trost, S. et M. O'Neil. 2014, «Clinical use of objective measures of physical activity», *Br J Sports Med.* 48(3) :178-81. 11
- Tsai, L., T. Wredmark, C. Johansson, K. Gibo, B. Engstrom et H. Tornqvist. 1991, «Shoulder function in patients with unoperated anterior shoulder instability», *Am J Sports Med.* 19(5) :469-73. 120
- Tsuji, H., M. Larson, F. Venditti, E. Manders, J. Evans, C. Feldman et D. Levy. 1996, «Impact of reduced heart rate variability on risk for cardiac events», . 105
- Twist, C. et J. Highton. 2013, «Monitoring fatigue and recovery in rugby league players», *Int J Sports Physiol Perform.* 8(5) :467-74. 88
- Twist, C., M. Waldron, J. Highton, D. Burt et M. Daniels. 2012, «Neuromuscular, biochemical and perceptual post-match fatigue in professional rugby league forwards and backs», *J Sports Sci.* 30(4) :359-67. 87
- Urhausen, W. et A. Kindermann. 2002, «Diagnosis of overtraining : What tools do we have?», *SportsMedicine*, vol. 32, n° 2, p. 95–102. 81, 90
- Uusitalo, A., A. Uusitalo et H. Rusko. 2000, «Heart rate and blood pressure variability during heavy training and overtraining in the female athlete», . 105
- Valter, D., C. Adam, M. Barry et C. Marco. 2006, «A new video-based performance analysis system», *International Journal of Performance Analysis in Sport*, vol. 6, n° 1, p. 108–1119. 8
- Van Den Tillar, R. et G. Ettema. 2004, «Effect of body size and gender in overarm throwing performance», *Eur Journal Appl Physiol.* 37
- Van Den Tillar, R. et G. Ettema. 2009, «Is there a proximal to distal sequence in overarm throwing in team handball?», *J Sports Sci*, vol. 27, p. 9. 140

- Vandewalle, H., G. Peres et H. Monod. 1987, «Standard anaerobic exercise tests», *Sports Med*, vol. 4, n° 4, p. 268—289. x, 50, 51
- Vanrenterghem, J., N. Nedergaard, M. Robinson et B. Drust. 2017, «Training Load Monitoring in Team Sports : A Novel Framework Separating Physiological and Biomechanical Load-Adaptation Pathways.», *Sports Med*, vol. 10. 75
- Varley, M., I. Fairweather et J. Aughey. 2012, «Validity and reliability of GPS for measuring instantaneous velocity during acceleration, deceleration, and constant motion», *Journal of Sports Sciences*. 30(2), 121-127. 17
- Wagner, H., T. Finkenzeller, S. Wurth et D. Von. 2014, «Individual and team performance in team handball : A review», *Journal of Sci and Med*. 13(4) : 808-816. 3, 4, 35, 36
- Wallace, L., K. Slattery et A. Coutts. 2014, «A comparison of methods for quantifying training load : Relationships between modelled and actual training responses.», *Eur J Appl Physiol*, vol. 114, n° 1, p. 11–20. 73
- Ward, D., K. Evenson, A. Vaughn, A. Rodgers et R. Troiano. 2005, «Accelerometer use in physical activity : Best practices and research recommendations», *Med Sci Sports Exerc*. 37(11 Suppl) :S582-8. 12
- Welk, G., S. Blair, K. Wood, S. Jones et R. Thompson. 2000, «A comparative evaluation of three accelerometry-based physical activity monitors», *Med Sci Sports Exerc*. 32(9) :489-97. 18
- Weston, M., J. Siegler, A. Bahnert, J. McBrien et R. Lovell. 2015, «The application of differential ratings of perceived exertion to australian football league matches», *Sports Medicine Australia*, vol. 18, n° 6, p. 704–708. 76
- Wilk, K., M. Reinold et J. Andrews. 2009, «The athlete's shoulder», *Vol second edition*. Philadelphia : Churchill Livingstone Elsevier. 33, 57, 62
- Winterbottom, W. 1952, «L'entraînement du footballeur», *Tout le football (EdS)*. Paris : Amiot-Dumont. 5
- Yamamoto, Y., R. Hughson et J. Peterson. 1991, «Autonomic control of heart rate during exercise studied by heart rate variability spectral analysis», *J Appl Physiol*. 71 : 1136-1142. 101
- Yang, C. et Y. Hsu. 2010, «A review of accelerometry-based wearable motion detectors for physical activity monitoring», *Sensors (Basel)*. 10(8) :7772-88. 10

- Young, W., C. MacDonald, T. Heggen et J. Fitzpatrick. 1997, «An evaluation of the specificity, validity and reliability of jumping tests.», *The Journal of sports medicine and physical fitness*, vol. 37, p. 240–245, ISSN 0022-4707. 151
- Young, W., M. McDowell et B. Scarlett. 2001, «Specificity of sprint and agility training methods», *JStrengthCondRes*, vol. 15, n° 3, p. 315–319. 52
- Zenon, A., M. Sidibe et E. Olivier. 2014, «Pupil size variations correlate with physical effort perception», *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, vol. 8, doi :10.3389/fnbeh.2014.00286. 172
- Ziv, G. et R. Lidor. 2009, «Physical characteristics, physiological attributes, and on-court performances of handball players : A review», *Eur J Sport Sci*. 9(6) : 375-386. 3, 22, 48, 112
- Zubillaga, A. 2006, «Evaluacion e intervencion en el ambito deportivo. amisco. sistema digital de registro en futbol», *DFA*. Vitoria. 8
- Zurutuza, U., J. Castellano, I. Echeazarra et D. Casamichana. 2017, «Absolute and relative training load and its relation to fatigue in football», *Frontiers in Psychology*, vol. 8, doi : 10.3389/fpsyg.2017.00878. 166

Valorisation du travail de thèse

Etude 1

EFFECTS OF PRECOMPETITIVE PREPARATION PERIOD ON THE ISOKINETIC MUSCULAR CHARACTERISTICS IN WORLD CLASS HANDBALL PLAYERS

OLIVIER MAURELLI,¹ PIERRE L. BERNARD,² ROMAIN DUBOIS,³ SAID AHMAIDI,¹ AND JACQUES PRIOUX⁴

¹Exercise Physiology and Rehabilitation Laboratory (EA-3300: APERE), Picardie Jules Verne University, Amiens, France;

²Euromov, UFR APS, University Montpellier 1, Montpellier, France; ³Laboratory of Physical Activity, Health and

AU2 Performance (EA 4445), University of Pau and Pays Adour, Tarbes, France; and ⁴Movement, Sport and Health Laboratory

AU3 (EA 1274), Faculty of Sport Science, Rennes, France

ABSTRACT

Maurelli, O, Bernard, PL, Dubois, R, Ahmaidi, S, and Prioux, J. Effects of precompetitive preparation period on the isokinetic muscular characteristics in world class handball players. *J Strength Cond Res* XX(X): 000–000, 2017–The aim of this study was to describe the effects of 8 weeks of precompetitive preparation period (Pc2P) on the isokinetic muscular characteristics in world-class handball players. Nineteen male professional players (age, 26.6 ± 5.4 years) participated in the study. Two bilateral isokinetic tests of knee joint flexors (H; hamstring) and extensors (Q; quadriceps) were performed before and after Pc2P to determine the peak torque (PT), the mean power (MP), and the ratios (agonist-antagonist, dominant-nondominant, and combined). For the PT, Q at low angular velocity ($60^\circ \cdot s^{-1}$) in concentric mode revealed no significant increase for the dominant or nondominant legs. For H, results showed a significant increase for both legs ($p < 0.001$). At the higher angular velocity ($240^\circ \cdot s^{-1}$), Q was significantly increased for the dominant ($p < 0.005$) and nondominant ($p < 0.002$) legs and also H for both sides ($p < 0.001$). Eccentric mode ($30^\circ \cdot s^{-1}$) showed a significant increase for dominant ($p < 0.005$) and nondominant ($p < 0.01$) legs. For MP, results showed significant increase at low angular velocity ($p < 0.003$) and high angular velocity ($p < 0.01$) for both legs. In eccentric mode, values showed a significant increase after Pc2P for dominant ($p < 0.001$) and nondominant ($p < 0.02$) legs. The ratios showed significant increase for the agonist-antagonist ratio at $60^\circ \cdot s^{-1}$ for dominant leg ($p < 0.003$) and the nondominant leg ($p < 0.01$). At $240^\circ \cdot s^{-1}$, the values showed a significant difference for both side ($p < 0.02$). From an injury risk perspective, in addition to optimizing performance, these results demonstrated that 8 weeks of Pc2P increased the

maximum strength and muscle power of international handball players, even if the ratios of the knee joint muscles did not change during this period.

KEY WORDS elite handball, muscular profile of the lower limbs, preseason period

INTRODUCTION

Handball is played by 2 teams of 7 players on a court measuring 40×20 m during matches of 2 periods lasting 30 minutes. The average actual playtime is 52.36 ± 5.92 minutes for an elite men's team (41) with field players moving for more than 60% of the total playing time with an average distance of $4,370 \pm 702$ m (45). Their activity consists of a succession of actions, such as jumps, sprints, offensive and defensive duels, shooting, and changes of direction, which are followed by random recoveries (35,40,44). These actions place high neuromuscular demand on the body, primarily on the lower limbs, and are repeated throughout the match; therefore, they are critical to performance (35).

Actions like duels require the production of maximum strength, whereas others, such as explosive actions, require a high rate of strength development and power (27) with contraction times of less than 250 milliseconds (2). Given the demand on the lower limb neuromuscular system, the investigation of knee muscle functioning adaptations in handball players is necessary (14). To assess these adaptations, several tests exist, such as the 1-repetition maximum (1RM) test, vertical jump tests (squat jump or countermovement jump), electromyography assessments (EMG), and isokinetic testing. Isometric test and EMG measurements from Thorlund et al. (51) have found that muscle and joint stress in elite handball players are side effects of fatigue following a game. Compared with others, the isokinetic dynamometer provides valid and reproducible measurements (7,12) to assess knee joint strength (13,34). Although the isokinetic device was initially used for muscular rehabilitation (11), it has become a reference for the exploration and research of

Address correspondence to: Olivier Maurelli, oliviermaurelli@yahoo.fr.
00(00)/1–10

Journal of Strength and Conditioning Research

© 2017 National Strength and Conditioning Association

strength and injury prevention in sports (9,15,20,22,34). Few studies have used an isokinetic dynamometer in handball players. González-Ravé et al. (26) and Holm et al. (31) have analyzed muscular profiles in elite male and female handball players to study isokinetic strength to optimize performance (26) and to prevent the cruciate ligaments rupture, respectively (31). A handball season consists of 2 distinct periods: a precompetitive preparation period (Pc2P) of 6–8 weeks and a competition period of 9 months (10,28,29). Usually, Pc2P focuses on developing technical and tactical skills in addition to the physical qualities needed to optimize performance for the competitive period (6). It also provides insight into the repeated stresses on muscles, which occur throughout the season and result in fatigue setting in gradually (24). In team sports, few authors have studied Pc2P. Although certain studies have analyzed the physical and physiological changes in competitive soccer (24,33,46) and rugby players (6), a few studies have referred to changes in isokinetic strength values in the lower limbs. Only Orchard et al. (43) specifically analyzed the changes in peak torque (PT) and the strength of quadriceps (Q) and hamstrings (H) in Australian soccer players. To date, no studies have investigated the effects of Pc2P on muscle adaptations in world-class handball players. However, the monitoring of isokinetic strength and muscle power before and after Pc2P, through the measuring of PT and mean power (MP) of Q and H, could be used to illustrate its effects in handball players and to reorient, if necessary, training methods during this time. Furthermore, the analysis of available dominant-nondominant (DNDR), agonist-antagonist (AAR), and combined ratios (CR) would accurately assess the muscular characteristics of each player, permitting injury prevention. The aim of our study was

then to analyze the effects of a Pc2P, with duration of 8 weeks, on the isokinetic muscle profile of the lower limbs in world-class handball players. We hypothesized that Pc2P would be an appropriate period to develop the isokinetic muscular performance, allowing athletes to begin the competitive period with optimized strength and power levels.

METHODS

Experimental Approach to the Problem

To achieve the purpose of our study, the handball players were monitored before and after Pc2P. All subjects were familiar with the isokinetic tests. Before and after Pc2P, these tests were always carried out at the same time of the day and in the same order for all the subjects. On the day of evaluation, after a standardized breakfast for all studied players, measurements of body mass and fat free mass were carried out. Afterward, the subjects then performed an isokinetic test.

Actually, Pc2P lasted 8 weeks and was organized to optimize performance at the end of this period (Figure 1). The cardiorespiratory function was the main focus of 16 sessions (17.8% of the total volume) on the whole of Pc2P. The training included 3 separate phases (Table 1). The first phase, with a duration of 2 weeks, focused on aerobic capacity development (65–80% of maximum heart rate [HRmax]) began (a) with continuous training sessions and (b) ended with fartlek sessions. During the first phase, subjects performed 3 sessions per week. The second phase of cardiorespiratory training, with a duration of 4 weeks, focused on maximum aerobic power development (85–100% HRmax). This phase was based at the beginning on long- and medium-interval training and at the end on short-interval training. During this phase, subjects performed 2 sessions

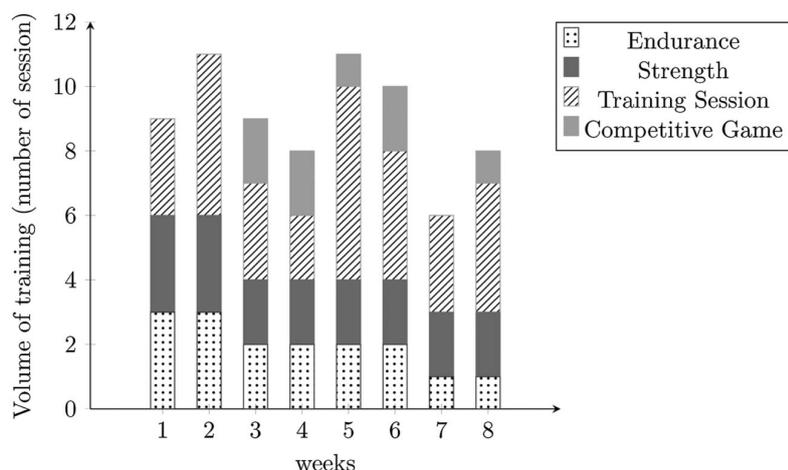


Figure 1. Evolution of the volume training in precompetitive preparation period.

per week. Finally, during the 2-week third phase of cardio-respiratory training, subjects performed only 1 session of maximum sprint training with a short recovery.

The technical and tactical training aspects of handball received the most attention with 46 sessions, accounting for 51.1% of the training volume of Pc2P. A psychomotor emphasis during these sessions allowed for the improvement of the general and specific motor skills of handball player (coordination, agility, lateralization, segmental dissociation). This focus represented 11 sessions for 12.2% of the total volume. Finally, muscle strengthening was also used during 17 sessions (Table 2), with 18.9% of the total training volume of Pc2P. During the first 2 weeks of training, which focused on endurance of strength, the intensity of the lower limb strength training ranged from 40 to 60% of 1RM. Three sessions per week were dedicated to this training. In the next phase of a duration of 4 weeks, which focused on hypertrophy and maximal strength, the intensity of lower limb strength training intensities was 70–90% 1RM. During this phase, players made 2 sessions per week. The number of sessions was deliberately limited to 2 per week, to account for the training load in handball, which emphasizes in particular the use of the lower body. In the final 2-week phase, which focused on power, players dedicated to weight training characterized by an intensity of 50–60% 1RM at the rate of 2 sessions per week.

T2

Subjects

Nineteen male handball players, either French or foreign and belonging to the professional league 1 (France), were recruited for the study. The players had a training experience (7.6 ± 1.3 years) of the highest level of expertise in France. Mean values (±SD) of age, height, weight, and body fat were 26.6 ± 5.4 years, 189.5 ± 5.1 cm, 91.8 ± 12.5 kg, and 10.2 ± 2.2%, respectively. Inclusion criteria were the following: being a male and being under contract for a minimum of 3 years. The exclusion criteria were chronic or acute diseases of the knee or lower limbs and pain in the knee or lower limbs at testing, contraindicating maximal concentric and eccentric exercise. All subjects have written informed consent to participate in the experiment in accordance with the Declaration of Helsinki. The study protocols were approved by the Ethics Committee of the local university and were carried out in agreement with the head doctor and validated by the medical committee of the club.

Procedures

Isokinetic Tests. Subjects were evaluated using a Biodex Isokinetic Dynamometer 3 System (Biodex Corp., Shirley, NY, USA) with gravity correction. Two bilateral tests of knee joint flexors (H) and extensors (Q) were performed before and after Pc2P in concentric and eccentric modes. The warm-up and setup procedure for the subjects were the same before and after Pc2P. Before the tests, the subjects warmed up on a cycle ergometer for 5 minutes by cycling against a load of 60 W at 90 rpm. This warm-up was

TABLE 1. Organization of the endurance training program over the Pc2P.*†

Weeks	Pc2P							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Objectives	AC				MAP-AP			
Modality	Continuous training, 40–50 min	Fartlek training, 30–40 min (10 s acceleration every minute)	8 × 3 min, R = 3 min	(10–12) × 1 min, R = 1 min	3 × (8 × 30 s), r = 30 s, R = 4 min	3 × (14 × 15 s), r = 15 s, R = 4 min	2 × (5 × 30 s), R = 4 min	2 × (6 × 5 s), r = 15 s, R = 8 min
Intensity Sessions	65–70% HRmax Tuesday Thursday Saturday	75–80% HRmax Tuesday Thursday Saturday	85–90% HRmax Monday Friday	90–95% HRmax Monday Friday	90–100% HRmax Monday Friday	90–100% HRmax Monday Friday	90–100% HRmax Tuesday	HR not used Tuesday

*Pc2P = precompetitive preparation period; AC = aerobic capacity; MAP = maximum aerobic power; AP = anaerobic power; R = recovery between series; r = recovery between repetitions; HRmax = maximum heart rate.

†Example: (3 × [8 × 30 seconds]), r = 30 seconds, R = 4 minutes. It means that the subject had to run 3 series of 8 times 30 seconds composed of 30 seconds running at 90–100% of HRmax and 30 seconds passive recovery. The subject recovers passively 4 minutes between each series. Each session is repeated 2 times a week.

TABLE 2. Organization of the lower-body strength training program over the Pc2P.^{‡†}

	Pc2P											
Weeks	1	2	3	4	5	6	7	8				
Objectives	Endurance of strength		Hypertrophy and maximal strength				Power					
Modality	Circuit training, 3 × 12 rep, R = 1 min 30 s per exercise, 4 rounds, R = 5 min		3 × 10 rep, R = 2 min		4 × (6-7) rep, R = 3 min		3 × 4 rep, R = 4 min		3 × (2 rep + 6 rep), R = 4 min		3 × 6 rep, R = 2 min 30 s	
Training session	Squat Core stability Leg curl Core stability Deadlift Core stability Leg extension Core stability Swing kettle Core stability		Squat Hack squat R: Deadlift Step-up Lunge Swing kettle		Squat Deadlift Power clean Step-up Lunge		Squat Deadlift Step-up Step-up + split squat Snatch		Squat + plyometry body weight Deadlift + clean and jerk Step-up + split squat Snatch		Step-up Squat Clean and jerk Clean and jerk Snatch Plyometry body weight	
Intensity	40% 1RM		70% 1RM		80% 1RM		90% 1RM		90% 1RM		60% 1RM	
Sessions	Monday Wednesday Friday		Monday Thursday		Monday Thursday		Monday Thursday		Monday Thursday		Monday Thursday	

[†]Pc2P = precompetitive preparation period; R = recovery; rep = repetitions; 1RM = 1-repetition maximum.

[‡]Example: (3 × [12 rep × 60% 1RM], R = 1 minute 30 seconds). It means that the subject had to realize 3 series of 12 repetitions at 60% 1RM. The subject recovers passively 1 minute 30 seconds between each series. Each session is repeated 3 times a week.

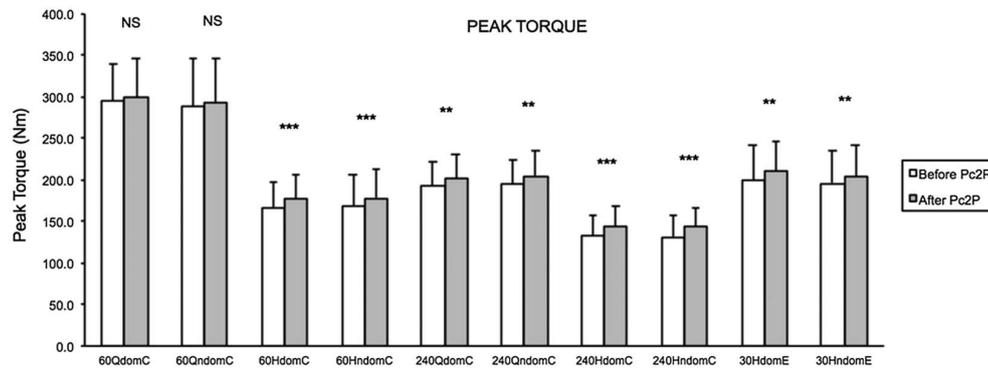


Figure 2. Evolution of the peak torque in concentric and eccentric modes. Q = quadriceps; H = hamstrings; 60QdomC = 60°·s⁻¹ on Q concentric dominant side; 60QndomC = 60°·s⁻¹ on Q concentric nondominant side; 60HdomC = 60°·s⁻¹ on H concentric dominant side; 60HndomC = 60°·s⁻¹ on H concentric nondominant side; 240QdomC = 240°·s⁻¹ on Q concentric dominant side; 240QndomC = 240°·s⁻¹ on Q concentric nondominant side; 240HdomC = 240°·s⁻¹ on H concentric dominant side; 240HndomC = 240°·s⁻¹ on H concentric nondominant side; 30HdomE = 30°·s⁻¹ on H eccentric dominant side; 30HndomE = 30°·s⁻¹ on H eccentric nondominant side; NS = no significant. ***p* < 0.01, ****p* < 0.001.

followed by active dynamic stretching of the psoas, Q, H, and gastrocnemius muscles. The range of motion during the test was 70°, from -10 to 60° angle, between the femur and the tibia to limit hamstring resistance during the extension. The length of the lever arm was individually determined, depending of the height of each players, and the resistance pad was placed 2 fingers above the medial malleolus. The tests were carried out bilaterally in a sitting position with a hip flexion angle of 110°, a trunk and waist strap, and the upper limbs crossed on the trunk. Each subject was

placed in a comfortable position that did not limit knee movement. The height and depth of the seat relative to the dynamometer's rotational axis and the length of the lever arm relative to the rotational axis were stored in the computer program (Biodex Medical, Inc.) to standardize the test's conditions. During testing, subjects were verbally encouraged by the same experimenter and gripped the sides of the seat for support.

Each test was preceded by a standardized warm-up of 2 sets of 5 repetitions at 60°·s⁻¹ in concentric mode separated

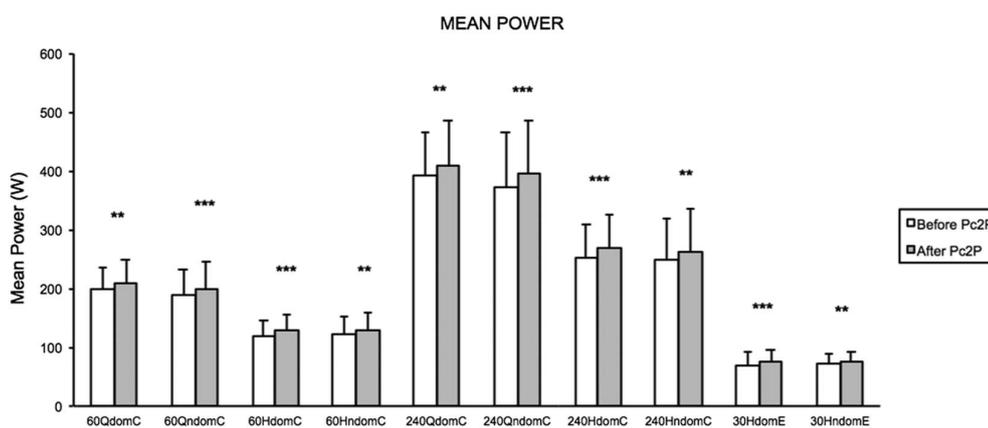


Figure 3. Evolution of the mean power in concentric and eccentric modes. Q = quadriceps; H = hamstrings; 60QdomC = 60°·s⁻¹ on Q concentric dominant side; 60QndomC = 60°·s⁻¹ on Q concentric nondominant side; 60HdomC = 60°·s⁻¹ on H concentric dominant side; 60HndomC = 60°·s⁻¹ on H concentric nondominant side; 240QdomC = 240°·s⁻¹ on Q concentric dominant side; 240QndomC = 240°·s⁻¹ on Q concentric nondominant side; 240HdomC = 240°·s⁻¹ on H concentric dominant side; 240HndomC = 240°·s⁻¹ on H concentric nondominant side; 30HdomE = 30°·s⁻¹ on H eccentric dominant side; 30HndomE = 30°·s⁻¹ on H eccentric nondominant side. ***p* < 0.01, ****p* < 0.001.

TABLE 3. Ratios analysis.*

	Concentric (60°·s ⁻¹)						Concentric (240°·s ⁻¹)							
	DNR			AAR			DNR			AAR			CR	
	RQ	RH	Dom	Ndom	RQ	RH	Dom	Ndom	RQ	RH	Dom	Ndom	Dom	Ndom
Before Pc2P, mean ± SD	1.04 ± 0.15	1.01 ± 0.19	0.57 ± 0.09	0.6 ± 0.13	1 ± 0.15	1.01 ± 0.1	0.68 ± 0.1	0.68 ± 0.12	1.05 ± 0.24	1.02 ± 0.23				
After Pc2P, mean ± SD	1.03 ± 0.11	1.01 ± 0.16	0.6 ± 0.09	0.61 ± 0.11	0.99 ± 0.14	1.01 ± 0.1	0.72 ± 0.07	0.7 ± 0.12	1.06 ± 0.21	1.02 ± 0.23				
p	NS	NS	0.003	0.01	NS	NS	0.02	0.02	NS	NS	0.02	0.02	NS	NS

*DNR = dominant-nondominant ratio; AAR = agonist-antagonist ratio; CR = combined ratio (eccentric at 30°·s⁻¹ of H and concentric at 240°·s⁻¹ of O); RQ = quadriceps ratio; RH = hamstring ratio; Dom = dominant; Ndom = nondominant; Pc2P = precompetitive preparation period; NS = no significant.

by 1 minute of recovery, following the 3 minutes of the initial cycling warm-up. The protocol started with an evaluation in the concentric and eccentric modes on the dominant leg, beginning with a series of 5 repetitions at 60°·s⁻¹, followed by 1 minute of recovery, then a new series of 5 repetitions at 240°·s⁻¹. After 1 minute of recovery, the evaluation of H at 30°·s⁻¹ in eccentric mode concluded the first part of the test. During the following 5-minute recovery, the subjects were set up for the evaluation of the nondominant leg following the same procedure.

The values of PT and the MP, expressed in absolute values and normalized by body weight, were used to calculate DNDR and AAR at 60 and 240°·s⁻¹ in concentric mode. In addition, the evaluation in eccentric mode allowed us to calculate CR from the H values measured at 30°·s⁻¹ in eccentric mode and the Q values measured at 240°·s⁻¹ in concentric mode.

Testing 1 Repetition Maximum. The 1RM test was measured after a standardized warm-up, which began with cardiorespiratory activation (aerobic capacity training at 70–75% of HRmax) and then an articular mobilization of lower limbs (ankles, knees, and hips). Subsequently, subjects began with 2 sets of 8–10 repetitions at 50 and 60% of 1RM. After this, subjects then performed successive 1RM starting at approximately 75% of 1RM and increased by 5% until reaching 1RM. There was a rest interval of 2–3 minutes between the sets. Each subject had 2 attempts on the last performance to be executed.

Testing Maximal Aerobic Velocity. The 20-m shuttle run test was originally designed by Leger and Lambert. The test is based on the completion of repeated shuttle runs between 2 lines placed 20 m apart. The running speed is incremental and dictated by audio signals from a tape recorder. The aim of the test is to complete as many shuttle runs as possible.

Anthropometrics Measures. Body mass was measured with the players wearing light indoor clothing and no shoes, using a Tanita Body Composition Analysis (TBF-3000; Tanita Corp., Tokyo, Japan). Percentage of fat mass was estimated from 4 skinfolds thicknesses (biceps, triceps, subscapular, and suprailiac), according to the method of Durnin and Rahman. Fat free mass was estimated as the difference between measured body mass and estimated body fat.

Statistical Analyses

All data are presented as mean ± SD. After conducting a test of normality, the nonparametric Wilcoxon's test for paired data was used to analyze the influence of Pc2P on PT, MP, DNDR, AAR, and CR. The significance level was set at p ≤ 0.05. When significant differences were found, effect size (ES) was assessed from the Cohen's d. Effect size of 0.20–0.60, 0.61–1.19, and ≥1.20 was considered small, moderate, and large, respectively.

RESULTS

Peak Torque

In concentric mode at $60^\circ \cdot s^{-1}$, the comparison of PT before and after Pc2P showed no significant difference in Q for the dominant and nondominant legs. For H, PT increased significantly for both legs ($p < 0.001$). At $240^\circ \cdot s^{-1}$, the results showed that Q was significantly increased for the dominant ($p < 0.005$) and nondominant ($p < 0.002$) legs and H for both sides ($p < 0.001$). In eccentric mode at $30^\circ \cdot s^{-1}$, results showed a significant increase for dominant ($p < 0.005$) and nondominant ($p < 0.01$) legs (Figure 2). The Cohen's *d* ES was -0.35 (small) in H for dominant leg and -0.25 (small) for nondominant leg at $60^\circ \cdot s^{-1}$. At $240^\circ \cdot s^{-1}$, ES was -0.27 (small) and -0.34 (small) for Q for dominant and nondominant legs, respectively. For H, ES was -0.48 (small) for dominant leg and -0.44 (small) for nondominant leg. At $30^\circ \cdot s^{-1}$ in eccentric, for H, ES was -0.27 (small) for dominant leg and -0.21 (small) for nondominant leg.

F2

Mean Power

In concentric mode at 60 and $240^\circ \cdot s^{-1}$, our results showed a significant increase of Q for the dominant ($p < 0.003$) and nondominant ($p < 0.001$) legs. For H, the values showed a significant increase for dominant side ($p < 0.001$) at 60 and $240^\circ \cdot s^{-1}$. For the nondominant side, our results showed a significant increase at $60^\circ \cdot s^{-1}$ ($p < 0.003$) and at $240^\circ \cdot s^{-1}$ ($p < 0.01$). In eccentric mode, we observed a significant increase in MP of H for the dominant ($p < 0.001$) and nondominant ($p < 0.02$) legs (Figure 3). At $60^\circ \cdot s^{-1}$, the Cohen's *d* ES was -0.26 (small) in Q for dominant leg and -0.24 (small) for nondominant leg. For H, ES was -0.30 (small) for dominant and -0.14 (small) for nondominant leg. At $240^\circ \cdot s^{-1}$, ES was -0.24 (small) for Q for dominant leg and -0.23 (small) for nondominant leg. For H, ES was -0.29 (small) for the dominant leg and -0.17 (small) for the nondominant leg. At $30^\circ \cdot s^{-1}$ in eccentric mode, for H, ES was -0.29 (small) for dominant leg and -0.17 (small) for nondominant leg.

F3

Dominant-NonDominant, Agonist-Antagonist, and Combined Ratios

At 60 and $240^\circ \cdot s^{-1}$, the results for DNDR in concentric mode showed no significant change for both legs. Our results for AAR showed significant difference at $60^\circ \cdot s^{-1}$ for dominant leg ($p < 0.003$) and nondominant leg ($p < 0.01$). At $240^\circ \cdot s^{-1}$, values showed significant difference for both legs ($p < 0.02$). Finally, CR showed no significant change (Table 3). The Cohen's *d* ES for AAR at $60^\circ \cdot s^{-1}$ was -0.32 (small) for dominant leg and -0.08 (small) for nondominant leg. At $240^\circ \cdot s^{-1}$, ES was -0.45 (small) for dominant leg and -0.16 (small) for nondominant leg.

T3

DISCUSSION

AU8

This study set out to investigate the influence of Pc2P on the isokinetic muscular characteristics of the knee joint in world-class handball players. The results showed a significant

impact of Pc2P on the development of MP in Q and H in concentric mode for the 2 velocities (60 and $240^\circ \cdot s^{-1}$) and for both legs. The Pc2P effects were slightly more limited in Q because no increase in PT was observed in concentric contraction at $60^\circ \cdot s^{-1}$ for the dominant and the nondominant legs.

These results can be explained in different ways. First, the duration of Pc2P (8 weeks) appeared to be sufficient to induce a significant improvement in the majority of strength and power values of H and to a lesser extent of Q. Second, these results may be explained by the Pc2P training, as a relatively large share of training sessions (18.9%) were dedicated to building muscle. The gain in strength and power after Pc2P may also be explained by the muscle deconditioning in these world-class handball players during the 5 weeks of training interruption preceding Pc2P. Indeed, Marquez and Badillo (39) indicated a significant decrease in the strength of handball throws after 7 weeks of training interruption, and Andersen et al. (3) reported lower isokinetic strength in sedentary adults after a 12-week period of inactivity. The significant increases noted above were observed despite the need to manage the optimal development of both strength and endurance qualities alongside technical and tactical sessions (51.1%) and preparation matches ($n = 8$) that coincided with Pc2P. The effects of the concurrent development of these 2 major muscle functional qualities have also been the subjects of several studies. Some studies have shown that strength gains are inhibited by the addition of endurance training sequences (18,30,48,50), mainly because of a physiological interference between 2 signaling pathways. One pathway stimulates growth factors like IGF-1, thereby optimizing protein synthesis and thus the increase in strength and hypertrophy: mTOR (mammalian-mechanistic target of rapamycin). The other stimulates the metabolism of carbohydrates and fatty acids: AMPK (metabolic activated protein kinase) (23), which inhibits mTOR and thus limits these training responses (17,42). To limit the negative effects of concurrent training in strength and endurance, a recent literature review (25) recommended not exceeding 2–3 endurance sessions per week, avoiding long-term running and always placing the power session before the endurance session. These potential interferences may explain in part the lack of significant change in the low angular velocity strength values for Q and not for H. However, H was not impacted by these interferences, thanks to regular sessions that included muscle strengthening of the posterior chain, and also by multiple positions of knee flexion found in handball.

The reduction of the number of strengthening exercises involving the anterior muscle chain in the thighs might be another possible explanation. We adapted the session contents and indirectly favored limited loading on Q because this muscle group is already highly solicited in handball. The results are consistent with the previous studies. Reilly and Thomas (46) showed that a 6-week Pc2P did not

significantly improve strength in the knee joint muscles of soccer players, whereas Dudley and Djamil (18) observed a significant improvement in muscle strength in the knee joint in a population of trained men and women but only at high angular velocity.

Precompetitive preparation period is a complex period, and training programs are dictated by the demands of the sport. Physical qualities will be developed according to the priorities set. Yet overall, too few studies have investigated the influence of Pc2P on knee strength gains (33), and further studies are needed. The significant increase in PT of H and Q at high angular velocity ($240^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$) can be explained by the repetition of explosive actions in handball (35). Compared with other team sports, such as rugby, handball training includes a high number of different types of practice sessions (including technical and tactical play and game on a half-sized court) from the first week of Pc2P for players to improve their specific motor skills, such as passing and shooting. A professional team, mainly composed of international players, participated in 46 handball-specific sessions during Pc2P. In each session, many actions were executed at high intensity. The study performed by Behm and Sale (8) found that the greatest strength gains were observed at velocities close to the training velocity. These results observed at high intensity reported that the significant effects on the isokinetic strength expressed at high angular velocity are the result of the combination of strength training sessions and specific activity sessions of Pc2P (21). The results of our study were, however, more pronounced for the power values, which are in agreement with the training program (Table 1). During Pc2P, the objective was primarily to develop power indices and not maximal strength. This objective is in agreement with the need for movements at high angular velocities in most team sports practiced at the highest level. These movements are systematically repeated during matches, especially during sprints involving the knee joint at velocities in the range of $600\text{--}700^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ (48). Regular high-speed segmental movements during handball activity support the motor adaptations at high velocities (21).

Precompetitive preparation period is also a key period for strengthening vulnerable muscle groups. To prevent injury, H strengthening is systematically included in the strength-building sessions. This may explain the significant increase in PT of H at low angular velocity ($60^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$). Furthermore, the significant increase in PT found at $30^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ in eccentric mode was likely because of the development of injury prevention routines during this period. Indeed, the mechanical needs of this muscle group, regularly constrained by the stretching phase during sports practice, constitute one of the justifications for the observed improvements in eccentric mode.

The constant need to optimize performance necessarily requires consideration of individual muscular characteristics and the assessment of how training influences muscle balance in the knee (1,4,13,34,37). For DNDR, our results showed no significant changes. In the early phase of Pc2P,

the ratio was already good, as demonstrated by a value close to 1.0. It is therefore normal that the ratio would not change in 8 weeks. These results also indicate that handball does not significantly affect major imbalances between the dominant and nondominant legs, even though handball players preferentially use the same leg when throwing.

For the notion of AAR balance, represented by the AAR, at $60^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ for dominant leg ($p < 0.003$), nondominant leg ($p < 0.01$) and at $240^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ for both side ($p < 0.02$), the Pc2P favors a significant increase. Nevertheless, the little changes near the reference values, from 0.6 at low velocity to 0.7 at high velocity, limit the interpretation of the data (14,20). Duration of Pc2P appears too short to expect changes in muscle balance or lead to physiological adaptations.

Regarding these 2 ratios, some authors (14,16,36) have critiqued their use because of their distance from functional reality and propose the use of CR. This last ratio measures the maximum strength of Q at high angular velocity ($240^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ in concentric mode) in relation to that of H at low angular velocity ($30^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ in eccentric mode), which could be more useful to prevent damage of H. Analysis reveals absence of significant changes and maintenance at a value slightly greater than 1.0 (Table 2). However, the results were satisfactory and suggest that Pc2P is not necessarily suitable for rebalancing ratios to prevent injury for several reasons. Physical training in Pc2P is mainly focused on developing strength and endurance. Given the high proportion of training time assigned to technical and tactical components (51.1%), which are essential factors of handball performance, it would be difficult to further increase the overall training load without the risk of overreaching or overtraining. This finding makes it problematic for an individualized treatment goal of achieving a balanced muscle mass. In addition, the Pc2P is perhaps not long enough to efficiently impact muscle imbalances, even though the program regularly includes prevention exercises.

Our results show that 8 weeks of Pc2P significantly increased isokinetic PT, except for PT at $60^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ and MP for the dominant and the nondominant sides for the 2 velocities of 60 and $240^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ in world-class handball players. The ratios did not change during this period, except for some AAR ratio; thus, the study shows that 8 weeks of Pc2P does not lead to a major imbalance of the knee joint muscles in world-class handball players.

One limitation of this study is that muscle groups were tested using an isokinetic dynamometer with a monoarticular approach, although sports are played in a closed system, suggesting that several muscle groups contribute to athletic performance. Moreover, it was impossible to establish a control group with regard to the elite level of the team (6).

PRACTICAL APPLICATIONS

To increase the efficiency of the training program and optimize performance in the season, the head coach of strength and conditioning will have to multiply the sessions

dedicated to the development of the strength and muscular power during this Pc2P. The study by Silva et al. (49) showed, in professional soccer players, that an important initial level of strength and muscular power leads to a less-marked decrease of performance in the game. Given these observations, it would be necessary that players start the season with their maximum capacity developed to tolerate the stress of a competitive season that usually runs for 9–10 months, with official matches played every week. Thereafter, the increasingly busy schedules do not allow for the maintenance of strength and muscular power. This has long been understood in rugby, which limits almost exclusively the first 3 weeks of Pc2P to physical work. In handball, there are several possibilities to consider to counteract this. In the absence of being able to lengthen the duration of Pc2P, it would be advantageous to modify the training program in volume or intensity or both. To optimize the Pc2P, it would be interesting to increase the number of practice sessions that are focused on maximal strength. For this reason, the organization of practice sessions initially planned (Table 2) for the first week of training to be dedicated to strength endurance, followed by a week of hypertrophy, followed directly by 3 weeks of maximal strength. These final 3 weeks could be followed by 2 weeks of power development by the method of contrasting loads (light-heavy) to maintain the strength levels for a longer period. Finally, the last week would focus exclusively on the development of explosivity. This new programming strategy would allow for 5 weeks of maximum strength training instead of the previously stated 3 weeks.

This study, which reveals Pc2P as an appropriate and measurable period, could guide the head coach of strength and conditioning, coaches of professional sports teams, and researchers to optimize the performance of professional players and consequently to better protect them from injuries acquired during the length of the sport's seasons, including the increase in quantity of competitions.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the professional handball players for their participation in this research. The authors have no financial or conflicts of interest to disclose. The results of the present study do not constitute endorsement by the National Strength and Conditioning Association.

AU10

REFERENCES

AU11

1. Aagaard, P, Simonsen, EB, Magnusson, SP, Larsson, B, and Dyhre-Poulsen, P. A new concept for isokinetic hamstring: Quadriceps muscle strength ratio. *Am J Sport Med* 26: 231–237, 1998.
2. Aagaard, P, Simonsen, EB, Andersen, JL, Magnusson, P, and Dyhre-Poulsen, P. Increased rate of strength development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J Appl Physiol* 93: 1326, 2002.
3. Andersen, LL, Andersen, JL, Magnusson, SP, Suetta, C, Madsen, JL, Christensen, LR, and Aagaard, P. Changes in the human muscle strength-velocity relationship in response to resistance training and subsequent detraining. *J Appl Physiol* 99: 87–94, 2005.
4. Andrade, MDS, De Lira, CAB, De Carvalho Koffes, F, Mascarin, NC, Bendito Silva, AA, and Da Silva, AC. Isokinetic hamstrings to quadriceps peak torque ratio: The influence of sport modality, gender and angular velocity. *J Sport Sci* 30: 547–553, 2013.
5. Antonio, J and Ciccone, V. The effects of pre versus post workout supplementation of creatine monohydrate on body composition and strength. *J Int Soc Sports Nutr* 10: 36, 2013.
6. Argus, CK, Gill, N, Keogh, J, Hopkins, WG, and Beaven, CM. Effects of short term pre-season training program on the body composition and anaerobic performance of professional rugby union players. *J Sport Sci* 28: 679–686, 2010.
7. Augustsson, J and Thomeé, R. Ability of closed and open kinetic chain tests of muscular strength to assess functional performance. *Scan J Med Sci Sports* 10: 164–168, 2000.
8. Behm, DG and Sale, DG. Velocity specificity of resistance training. *Sports Med* 15: 374–388, 1993.
9. Bernard, PL and Amato, M. Influence of sport discipline and age on balance of the knee joint muscles. *Sci Sport* 24: 173–177, 2009.
10. Bresciani, G, Cuevas, MJ, Garatachea, N, Molinero, O, Almar, M, De Paz, JA, Marquez, S, and Gonzalez-Gallego, J. Monitoring biological and psychological measures throughout an entire season in male handball players. *Eur J Sport Sci* 10: 377–384, 2010.
11. Calmels, P and Minaire, P. A review of the role of the agonist/antagonist muscle pairs ratio in rehabilitation. *Disabil Rehabil* 17: 265–276, 1995.
12. Croisier, JL, Forthomme, B, Namurois, MH, Vanderthommen, M, and Crielaard, JM. Hamstring muscle strain recurrence and strength performance disorders. *Am J Sport Med* 30: 199–203, 2002.
13. Croisier, JL, Malnati, M, Reichard, LB, Peretz, C, and Dvir, Z. Quadriceps and hamstring isokinetic strength and electromyographic activity measured at different ranges of motion: A reproductibility study. *J Electromyogr Kinesiol* 17: 484–492, 2007.
14. Croisier, JL, Ganteaume, S, Binet, J, Genty, M, and Ferret, JM. Strength imbalances and prevention of hamstring injury in professional soccer players: A prospective study. *Am J Sport Med* 36: 1469–1475, 2008.
15. Davies, GJ and Heiderscheit, BC. Reliability of the lido linea closed kinetic chain isokinetic dynamometer. *J Orthop Sport Phys* 25: 133–136, 1997.
16. Denot-Ledunois, S and Fossier, E. Quadriceps femoris muscle relationships in isokinetic: Concentric or eccentric. *Sci Sport* 9: 161–163, 1994.
17. Docherty, D and Sporer, B. A proposed model for examining the interference phenomenon between concurrent aerobic and strength training. *Sports Med* 30: 385–394, 2000.
18. Dudley, GA and Djamil, R. Incompatibility of endurance and strength-training modes of exercise. *J Appl Physiol* 59: 1446–1451, 1985.
19. Durnin, J and Rahaman, M. The assessment of the amount of fat in the human body from measurements of skinfold thickness. *Br J Nutr* 21: 681–689, 1967.
20. Dvir, Z. *Isokinetics: Muscle Testing, Interpretation and Clinical Applications* (2nd ed.). Edinburgh, Scotland: Elsevier-Churchill Livingstone, 2004.
21. Eniseler, N, Sahan, C, Vurgun, H, and Mavi, HF. Isokinetic strength responses to season-long training and competition in Turkish elite soccer players. *J Hum Kinet* 31: 159–168, 2012.
22. Feiring, DC, Ellenbecker, TS, and Dercheid, GL. Test-retest reliability of the Biodex isokinetic dynamometer. *J Orthop Sport Phys* 11: 298–300, 1990.
23. Foretz, M, Taleux, N, Giguas, B, Horman, S, Beauloye, C, Andreeli, F, Bertrand, L, and Viollet, B. Regulation of energy metabolism by AMPK: A novel therapeutic approach for the treatment of metabolic and cardiovascular diseases. *Med Sci* 22: 381–388, 2006.
24. Frisch, A, Urhausen, A, Seil, R, Croisier, JL, Windal, T, and Theisen, D. Association between preseason functional tests and injuries in youth football: A prospective follow-up. *Scand J Med Sci Sports* 21: 468–476, 2011.

25. Fyfe, JJ, Bishop, DJ, and Stepto, NK. Interference between concurrent resistance and endurance exercise: Molecular bases and the role of individual training variables. *Sports Med* 44: 743–762, 2014.
26. González-Ravé, JM, Juárez, D, Rubio-Arias, JA, Clemente-Suarez, VJ, Martínez-Valencia, MA, and Abian-Vicen, J. Isokinetic leg strength and power in elite handball players. *J Hum Kinet* 8: 227–233, 2014.
27. Gorostiaga, EM, Granados, C, Ibanez, J, and Izquierdo, M. Differences in physical fitness and throwing velocity among elite and amateur male handball players. *Int J Sports Med* 26: 225–232, 2005.
28. Gorostiaga, EM, Granados, C, Ibañez, J, González-Badillo, JJ, and Izquierdo, M. Effects of an entire season on physical fitness changes in elite male handball players. *Med Sci Sport Exer* 38: 357–366, 2006.
29. Granados, C, Izquierdo, M, Ibanez, J, Ruesta, M, and Gorostiaga, EM. Effects of an entire season on physical fitness in elite female handball players. *Med Sci Sport Exer* 40: 351–361, 2008.
30. Hennessy, LC and Watson, AWS. The interference effects of training for strength and endurance simultaneously. *J Strength Cond Res* 8: 12–19, 1994.
31. Holm, I, Fosdahl, MA, Friis, A, Risberg, MA, Myklebust, G, and Steen, H. Effect of neuromuscular training on proprioception, balance, muscle strength, and lower limb function in female team handball players. *Clin J Sport Med* 14: 88–94, 2004.
32. Hopkins, WG, Marshall, SW, Batterham, AM, and Hanin, J. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sport Exer* 41: 3–13, 2009.
33. İşlegen, C and Akgün, N. Effects of 6 weeks pre-seasonal training on physical fitness among soccer players. In: *Science and Football II*. T Reilly, A Lees, K Davids, and WJ Murphy, eds. London, United Kingdom: E & FN Spon, 1988. pp. 125–128.
34. Kannus, P. Isokinetic evaluation of muscular performance: Implications for muscle testing and rehabilitation. *Int J Sports Med* 15: 11–18, 1994.
35. Karcher, C and Buchheit, M. On-court demands of elite handball, with special reference to playing positions. *Sports Med* 44: 797–814, 2014.
36. Knapik, JJ, Bauman, CL, Jones, BH, Harris, JM, and Vaughan, L. Preseason strength and flexibility imbalances associated with athletic injuries in female collegiate athletes. *Am J Sport Med* 19: 76–81, 1991.
37. Kong, PW and Burns, SF. Bilateral difference in hamstrings to quadriceps ratio in healthy males and female. *Phys Ther Sport* 11: 12–17, 2010.
38. Leger, LA and Lambert, J. A maximal multistage 20-m shuttle run test to predict VO₂ max. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 49: 1–12, 1982.
39. Marquez, MA and Badillo, JJG. In season resistance training and detraining in professional team handball players. *J Strength Cond Res* 20: 563–571, 2006.
40. Michalsik, LB, Aagaard, P, and Madsen, K. Locomotion characteristics and match induced impairments in physical performance in male elite team handball players. *Int J Sports Med* 34: 590–599, 2013.
41. Michalsik, LB, Madsen, K, and Aagaard, P. Physiological capacity and physical testing in male elite team handball. *Int J Sports Med* 55: 415–429, 2015.
42. Nader, GA. Concurrent strength and endurance training: From molecules to man. *Med Sci Sport Exer* 38: 1965–1970, 2006.
43. Orchard, J, Mardsen, J, Lord, S, and Garlick, D. Preseason hamstring muscle weakness associated with hamstring muscle injury in Australian footballers. *Am J Sport Med* 25: 81–85, 1997.
44. Povoas, SCA, Ascensao, AAMR, Magalhaes, J, Seabra, AFT, Krusturup, P, Soares, JMC, and Rebello, ANC. Physiological demands of elite team handball with special reference to playing position. *J Strength Cond Res* 28: 430–442, 2014.
45. Povoas, SCA, Seabra, AFT, Ascensao, AAMR, Magalhaes, J, Soares, JMC, and Rebello, ANC. Physical and physiological demands of elite team handball. *J Strength Cond Res* 26: 3366–3376, 2012.
46. Reilly, T and Thomas, V. Effects of a program of pre-season training on the fitness of soccer players. *J Sport Med Phys Fitness* 17: 401–412, 1977.
47. Rochcongar, P. Isokinetic thigh muscle strength in sports: A review. *Ann Readapt Med Phys* 47: 274–281, 2004.
48. Sale, D, Jacobs, I, MacDougall, J, and Garner, S. Comparison of two regimens of concurrent strength and endurance training. *Med Sci Sport Exer* 22: 348–356, 1990.
49. Silva, JR, Magalhaes, JF, Ascensao, AA, Seabra, AF, and Rebelo, AN. Training status and match activity of professional soccer players throughout a season. *J Strength Cond Res* 27: 20–30, 2013.
50. Tanaka, H and Swensen, T. Impact of resistance training on endurance performance. *Sports Med* 25: 191–200, 1998.
51. Thorlund, JB, Michalsik, LB, Madsen, K, and Aagaard, P. Acute fatigue-induced changes in muscle mechanical properties and neuromuscular activity in elite handball players following a handball match. *Scand J Med Sci Sports* 18: 462–472, 2008.

Etude 2

EFFECTS OF THE COMPETITIVE SEASON ON THE ISOKINETIC MUSCLE PARAMETERS CHANGES IN WORLD-CLASS HANDBALL PLAYERS

OLIVIER MAURELLI,¹ PIERRE L. BERNARD,² ROMAIN DUBOIS,³ SAID AHMAIDI,¹ AND JACQUES PRIOUX⁴

¹Exercise Physiology and Rehabilitation Laboratory (EA-3300: APERE), Picardie Jules Verne University, Amiens, France;

²Euromov, UFR APS, University Montpellier 1, Montpellier, France; ³Laboratory of Physical Activity, Health and

⁴Performance (EA 4445), University of Pau and Pays Adour, Tarbes, France; and ⁴Movement, Sport and Health Laboratory (EA 1274), Faculty of Sport Science, Rennes, France

ABSTRACT

Maurelli, O, Bernard, PL, Dubois, R, Ahmaidi, S, and Prioux, J. Effects of the competitive season on the isokinetic muscle parameters changes in world-class handball players. *J Strength Cond Res XX(X): 000–000*, 2018–The aim of this study is to investigate the effects of the competitive season on isokinetic muscular parameters of the lower limbs in world-class handball players. Nineteen, male, world-class, handball players (age, 26.6 ± 5.4 years) participated in the study. Two bilateral isokinetic tests of knee joint flexors (H; hamstring) and extensors (Q; quadriceps) were performed in the beginning and end of the competitive season to determine the peak torque (PT), the mean power, and agonist-antagonist ratio, dominant-nondominant ratio (DNDR), and combined ratio. The results showed a significant decrease in PT values at low angular velocity ($60^\circ \cdot s^{-1}$) in concentric mode for Q on dominant leg ($p < 0.001$). The other PT values for dominant and nondominant legs at low and high angular velocities ($240^\circ \cdot s^{-1}$) and in eccentric mode ($30^\circ \cdot s^{-1}$) were not significantly different for Q and H. For mean power, values did not change at $60^\circ \cdot s^{-1}$. At $240^\circ \cdot s^{-1}$, we found a significant decrease in H for dominant leg ($p < 0.001$) but not for nondominant leg. In eccentric mode, the results showed a significant increase on both legs ($p < 0.001$). For the ratios, values significantly decreased for DNDR at $60^\circ \cdot s^{-1}$ for Q ($p < 0.03$) and for agonist/antagonist ratio at $240^\circ \cdot s^{-1}$ for the dominant leg ($p < 0.01$). The present results highlight the importance of integrating regular strength training sessions during the competitive season in world-class handball players. Accordingly, this study should help trainers to modify their planning to maximize

strength and power qualities of the lower limbs of their players in addition to avoiding injuries.

KEY WORDS elite handball, muscular profile of the lower limbs, entire season

INTRODUCTION

Handball is an Olympic team sport that opposes 2 teams of 7 players on a court of 800 m². It is characterized by playtime of 2 periods of 30 minutes including a wide range of defensive and offensive actions, such as duels, jumping, sprinting, shooting, and the ability of changing direction. These actions represent the majority of components in handball performance (26). They are invariably challenged during training and competition, where they regularly require high levels of strength and power for both quadriceps (Q) and hamstring (H) muscles (5,47). Several tests exist to assess the muscular characteristics of the lower limbs. The field tests, such as the 1-repetition maximum (1RM) test, allow to measure the maximum strength of a specific muscular movement. The squat jump test or countermovement jump test enables the measurement of vertical jump. However, those tests are not necessarily precise and reliable to follow-up the strength and power values. Recently, the mechanical capabilities of the neuromuscular system can be assessed by the linear “force-speed” relationship and the “power-speed” parabolic relation or ratio. The work of Jidovtseff (23) and Samozino et al. (37) focuses on determining the muscular profile of the athletes’ lower limbs in an optimal strategy of developing maximum power. Nevertheless, all these field tests are primarily aimed at identifying the athletes’ individual profiles and guiding the training contents. In addition to field tests, electromyography assessments and isokinetic testing can characterize muscle function. The most common evaluation is to assess both Q and H strength and power using a reliable and reproducible isokinetic device (24,27).

Some studies have centered its interests on the effects of an entire competition season on the isokinetic muscular

Address correspondence to Olivier Maurelli, oliviermaurelli@gmail.com.

00(00)/1–10

Journal of Strength and Conditioning Research

© 2018 National Strength and Conditioning Association

characteristics in soccer (10,28) and basketball (20). Other studies have investigated on cardiorespiratory and muscular changes (strength and maximum power) during an entire competition season in handball (16,17,30), but no studies have been conducted in the longitudinal follow-up of muscular adaptations in world-class handball players over a full competitive season. The monitoring of isokinetic strength and muscle power throughout a full competitive season through measuring peak torque (PT) and mean power (MP) of Q and H will attempt to illustrate its effects in professional handball players belonging to the European elite and to reorient, if necessary, training methods during this time. At the very least, the analysis of available dominant-nondominant ratio (DNDR), agonist-antagonist ratio (AAR), and combined ratio (CR) would allow for the accurate and detailed assessment of muscular characteristics of each individual player, allowing for the prevention of injuries (42). The objective of this study was, therefore, to study the changes in the lower limbs, specifically the characteristics of the isokinetic muscles, during a full competitive season for world-class handball players. Our hypothesis was that a competitive season, including many games and training (16), maintains the values of isokinetic muscle strength and power.

METHODS

Experimental Approach to the Problem

Throughout the season, the objective was to maintain peak performance level in all players. The training schedule required various actions, predominantly distributed between technical-tactical, game, and strength and endurance training sessions (Table 1). The 39-week competitive season, not including the precompetitive preparation period (Pc2P), was structured around several periods of strength and endurance development (Table 2).

The maximal strength training of lower limbs was performed at 90% intensity of 1RM. For hypertrophy development, exercise intensity was set as 70% of 1RM.

The power development sessions, performed at intensities of 50–60% of 1RM and those of explosivity, executed at 30% of 1RM at maximum speed represented the largest number of sequences (Figure 1).

The endurance training emphasizing the development of aerobic capacity was tested at intensities ranging between 65 and 75% of maximum aerobic velocity. The maximum aerobic power intensity ranged at 110% of maximal aerobic velocity. Finally, the sessions of anaerobic power and repeated sprint ability were tested at maximal intensity (sprint). With the exception of bruises caused by body contacts between players, all injuries of the lower limbs have been listed throughout the competitive season (Figure 2).

An elite French handball team participated in this study. To address the objective of the study, the team was monitored during an entire competitive season. Measures of physical characteristics (such as stature, body mass, and fat) and isokinetic muscle strength (PT, MP, and different ratios) were analyzed at the start and the end of the competitive season.

On each day of the evaluation, after a standardized breakfast for all participants, subjects were tested in laboratory. These tests were always performed at the same time of day and in the same order for all the subjects. During this experimental phase, anthropometric measurements, including measurements of stature, body mass, and fat, were measured. Then, each subject performed an isokinetic test to establish a muscular profile. All subjects were familiar with the isokinetic evaluation. A complete 39-week competitive season heavily structured on physical, technical, and tactical work bridged the 2 testing days.

Subjects

Nineteen, male, handball players, either French or foreign, and belonging to the professional League 1 (France) were recruited for the study. The players had a training experience (7.6 ± 1.3 years) of the highest level of expertise in France. Mean values

AU4

T1

T2

F1

F2

TABLE 1. Number and distribution of training sessions.*†

Period	Distribution of training sessions			
	Pc2P (8 wk)	1st part of season (17 wk)	2nd part of season (22 wk)	Entire season (47 wk)
Technical-tactics sessions (distribution)	46 (52.3%)	80 (61.6%)	100 (58.8%)	226
Games sessions (distribution)	8 (9.1%)	25 (19.2%)	35 (20.6%)	68
Strength training sessions (distribution)	18 (20.4%)	15 (11.5%)	20 (11.8%)	53
Endurance training sessions (distribution)	16 (18.2%)	10 (7.7%)	15 (8.8%)	41
Total sessions	88	130	170	388

*Pc2P = precompetitive preparation period.
 †The top values represent the number of training sessions, and the values in brackets correspond to the distribution of the training sessions.

TABLE 2. Training program over the entire season.*†

		Annual training program											
		9-10	11-16	17-18	19-22	23-25	28-29	30-31	32-35	36-38	39-40	41-44	45-47
Endurance training sessions		RSA 5 s sprint, <i>r</i> = 15 s, 2 × 6 reps, <i>R</i> = 8 min	MAP 15 s, 110% MAV, <i>r</i> = 15 s, 3 × 14 reps, <i>R</i> = 4 min	AP: 30 s sprint, <i>r</i> = 4 min, 2 × 5 reps, <i>R</i> = 5 min	RSA: 5 s sprint, <i>r</i> = 15 s, 2 × 6 reps, <i>R</i> = 8 min	RSA: 5 s sprint, <i>r</i> = 15 s, 2 × 6 reps, <i>R</i> = 8 min	AC: 45 min, 65-75% MAS	MAP: 15 s, 110% MAV, <i>r</i> = 15 s, 3 × 14 reps, <i>R</i> = 4 min	AP: 30 s sprint, <i>r</i> = 4 min, 2 × 5 reps, <i>R</i> = 5 min	RSA: 5 s sprint, <i>r</i> = 15 s, 2 × 6 reps, <i>R</i> = 8 min	MAP: 15 s, 110% MAV, <i>r</i> = 15 s, 3 × 14 reps, <i>R</i> = 4 min	AP: 30 s sprint, <i>r</i> = 4 min, 2 × 5 reps, <i>R</i> = 5 min	RSA: 5 s sprint, <i>r</i> = 15 s, 2 × 6 reps, <i>R</i> = 8 min
No. of endurance sessions		2	3	1	2	2	4	2	2	3	2	1	1
Strength training sessions		Explosivity: 3 × 6 reps × 30% 1RM, 3 min squat, deadlift step-up	Power: 3 × 6 reps × 60% 1RM, 2 min squat, deadlift step-up	Maximal strength: 3 × 4 reps × 90% 1RM, 4 min squat, deadlift	Power: 3 × 6 reps × 50% 1RM, 30 min squat, deadlift step-up	Explosivity: 3 × 6 reps × 30% 1RM, 3 min squat, deadlift step-up	Hypertrophy: 12 × 10 reps × 70% 1RM, <i>R</i> = 2 min squat, press	Maximal strength: 3 × 4 reps × 90% 1RM, 4 min squat, deadlift	Power 3 × 6 reps × 50% 1RM, 30 min squat, deadlift step-up	Explosivity: 3 × 6 reps × 30% 1RM, 3 min squat, deadlift step-up	Maximal strength: 3 × 4 reps × 90% 1RM, 4 min squat, deadlift	Power: 3 × 6 reps × 50% 1RM, 30 min squat, deadlift step-up	Explosivity: 3 × 6 reps × 30% 1RM, 3 min squat, deadlift step-up
No. of strength sessions		2	6	1	3	3	6	2	4	3	1	2	2
Technical-tactics sessions		10	27	12	15	16	11	12	22	13	10	21	11

*AC = aerobic capacity; MAP = maximum aerobic power; AP = anaerobic power; RSA = repeated sprints ability; MAV = maximum aerobic velocity; HR = heart rate; 1RM = one maximum repetition; Reps = repetitions; *r* = recovery between repetitions; *R* = recovery between series.
 †Weeks 26 and 27 represent holidays for all the players.

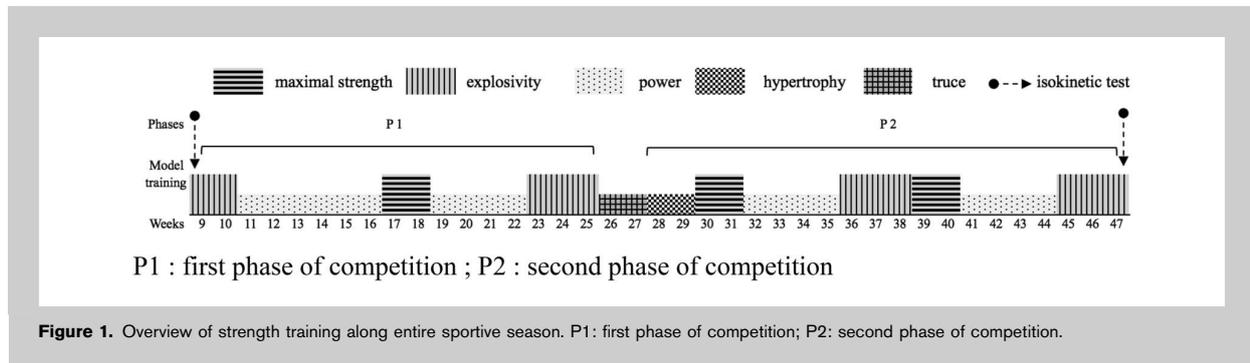


Figure 1. Overview of strength training along entire sportive season. P1: first phase of competition; P2: second phase of competition.

(±SD) of age, stature, body mass, and fat were 26.6 ± 5.4 years, 189.5 ± 5.1 cm, 93.7 ± 11.9 kg, and 10.6 ± 2%, respectively. Inclusion criteria were the following: being a male and being under contract for a minimum of 3 years. The exclusion criteria were chronic or acute diseases and pain of the knees or lower limbs at testing and contraindicating maximal concentric and eccentric exercise. All subjects have written informed consent to participate in the experiment in accordance with the Declaration of Helsinki. The study protocols were approved by the Ethics Committee of the local university and were carried out in agreement with the head doctor and validated by the medical committee of the club.

Procedures

Isokinetic Tests. Subjects were evaluated using a Biodex Isokinetic Dynamometer 3 System (Biodex, Corp., Shirley,

NY, USA) with gravity correction. After Pc2P, 2 bilateral tests of knee joint flexors (H) and extensors (Q) were performed in concentric and eccentric modes at the beginning of season in September and at the end of season in June. The first test (Pre), which was performed after Pc2P, allowed for the individualization of muscle training sessions. The second test (Post) was performed at the end of the season and allowed for the study of the effects of a full competitive season on changes in PT, MP, DNDR, AAR, and CR values. The warm-up and set-up procedures were the same for both Pre and Post tests. Before the tests, the subjects warmed up on a cycle ergometer for 5 minutes by cycling against a load of 60 W at 90 rotations·min⁻¹. This warm-up was followed by active dynamic stretching of the psoas, Q, H, and gastrocnemius muscles. The range of motion during the test was 70°, from -10° to 60° angle,

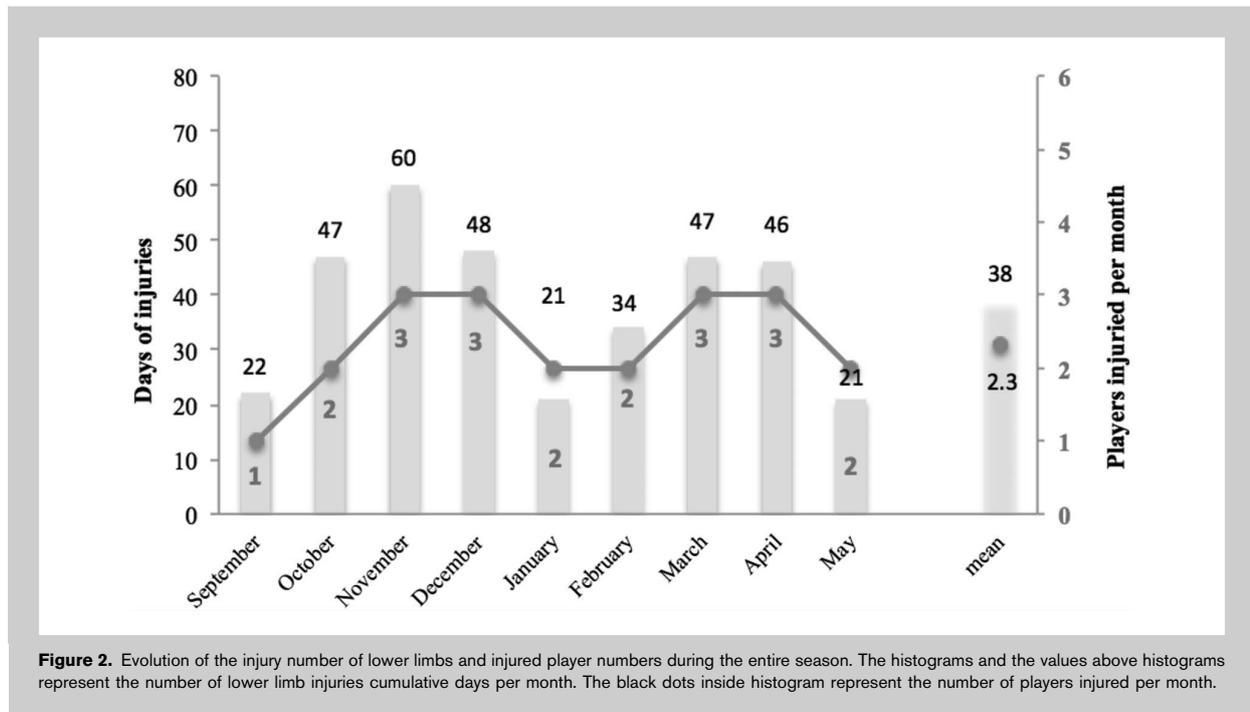


Figure 2. Evolution of the injury number of lower limbs and injured player numbers during the entire season. The histograms and the values above histograms represent the number of lower limb injuries cumulative days per month. The black dots inside histogram represent the number of players injured per month.

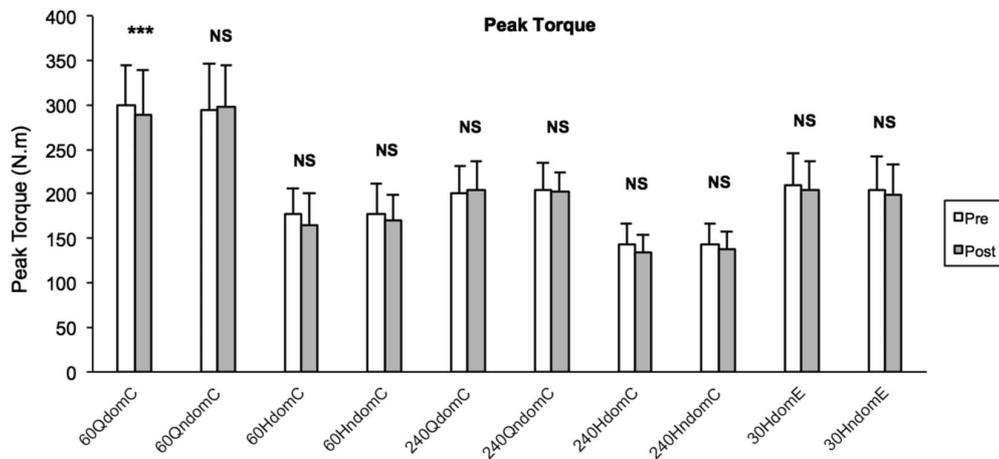


Figure 3. Evolution of the peak torque in concentric and eccentric modes. Pre = precompetitive season; Post = postcompetitive season; Q = Quadriceps; H = Hamstrings; 60QdomC = $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ on Q concentric dominant side; 60QndomC = $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ on Q concentric nondominant side; 60HdomC = $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ on H concentric dominant side; 60HndomC = $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ on H concentric nondominant side; 240QdomC = $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ on Q concentric dominant side; 240QndomC = $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ on Q concentric nondominant side; 240HdomC = $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ on H concentric dominant side; 240HndomC = $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ on H concentric nondominant side; 30HdomE = $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ on H eccentric dominant side; 30HndomE = $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ on H eccentric nondominant side; NS = no significant; *** $p < 0.001$.

between the femur and the tibia to limit hamstring resistance during the extension. The length of the lever arm was individually determined, depending of the height of each players, and the resistance pad was placed 2 fingers above the medial malleolus. The tests were performed bilaterally in a sitting

position with a hip flexion angle of 110° , a trunk and waist strap, and the upper limbs crossed on the trunk. Each subject was placed in a comfortable position that did not limit knee movement. The height and depth of the seat relative to the dynamometer's rotational axis and the length of the lever

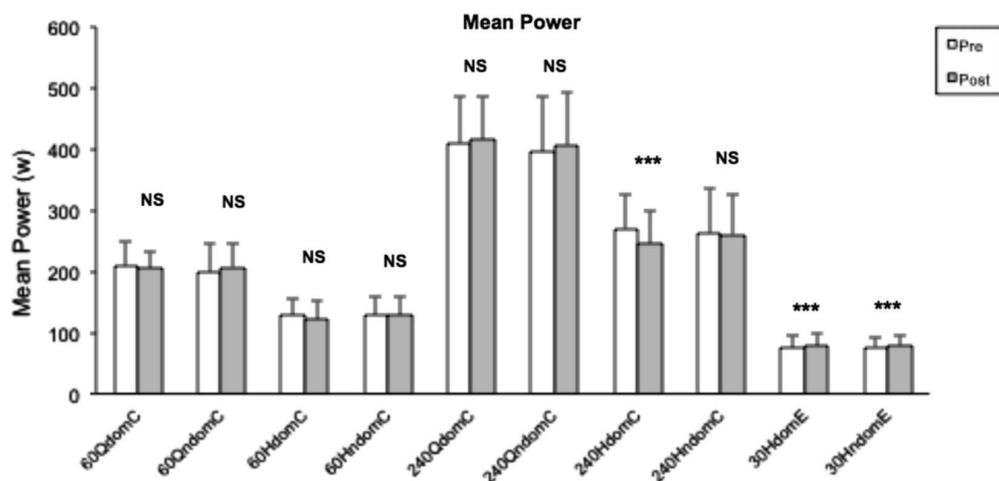


Figure 4. Evolution of the mean power in concentric and eccentric modes. Pre = precompetitive season; Post = postcompetitive season; Q = quadriceps; H = hamstrings; 60QdomC = $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ on Q concentric dominant side; 60QndomC = $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ on Q concentric nondominant side; 60HdomC = $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ on H concentric dominant side; 60HndomC = $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ on H concentric nondominant side; 240QdomC = $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ on Q concentric dominant side; 240QndomC = $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ on Q concentric nondominant side; 240HdomC = $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ on H concentric dominant side; 240HndomC = $240^{\circ} \cdot s^{-1}$ on H concentric nondominant side; 30HdomE = $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ on H eccentric dominant side; 30HndomE = $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ on H eccentric nondominant side; NS = no significant; *** $p < 0.001$.

AU11

arm relative to the rotational axis were stored in the computer program (Biodex Medical, Inc.) to standardize the test's conditions. During testing, subjects were verbally encouraged by the same experimenter and gripped the sides of the seat for support.

Each test was preceded by a standardized warm-up of 2 sets of 5 repetitions at $60^\circ \cdot s^{-1}$ in concentric mode separated by 1 minute of recovery, following the 3 minutes of the initial cycling warm-up. The protocol started with an evaluation in the concentric modes on the dominant leg, beginning with a series of 5 repetitions at $60^\circ \cdot s^{-1}$, followed by 1 minute of recovery, and then a final set of 5 repetitions at $240^\circ \cdot s^{-1}$. After 1 minute of recovery, evaluation of H at $30^\circ \cdot s^{-1}$ in eccentric mode concluded the first part of the test. During the following 5-minute recovery, the subjects were set up for the evaluation of the nondominant leg following the same procedure (34).

The values of PT and MP, expressed in absolute values and normalized by body weight, were used to calculate the DNDR and AAR, at 60 and $240^\circ \cdot s^{-1}$ in concentric mode. In addition, the evaluation in eccentric mode allowed us to calculate the CR (H values measured at $30^\circ \cdot s^{-1}$ in eccentric mode and the Q values measured at $240^\circ \cdot s^{-1}$ in concentric mode). The validity and the reproducibility of the used Biodex isokinetic dynamometer system have already been shown for all the parameters mentioned above by Drouin et al. (7).

Testing 1-Repetition Maximum. The 1RM test was measured on squat, deadlift, and step-up movement after a standardized warm-up, which began with cardiorespiratory activation

(aerobic capacity training at 70–75% of HRmax) and then an articular mobilization of lower limbs (ankles, knees, and hips). Subsequently, subjects began with 2 sets of 8–10 repetitions at 50 and 60% of 1RM. After this, subjects then performed successive 1RM starting at approximately 75% of 1RM and increased by 5% until reaching 1RM. There was a rest interval of 2–3 minutes between the sets. Each subject had 2 attempts on the last performance to be executed (1).

Testing Maximal Aerobic Velocity. The 20-m shuttle run test was originally designed by Leger and Lambert (29). The test is based on the completion of repeated shuttle runs between 2 lines placed 20 m apart. The running speed is incremental and dictated by audio signals from a tape recorder. The aim of the test is to complete as many shuttle runs as possible.

Anthropometrics Measures. Stature was measured using a Tanita HR-001 (Tanita, Corp., Tokyo, Japan). Body mass was measured with the players wearing light indoor clothing and no shoes, using a Tanita Body Composition Analysis (TBF-3000; Tanita, Corp.). Percentage of fat was estimated from 4 skinfold thicknesses (biceps, triceps, subscapular, and suprailiac), according to the method of Durnin and Rahaman (9). Fat-free mass was estimated as the difference between measured body mass and estimated fat.

Statistical Analyses

All data are presented as mean \pm SD. After conducting a test of normality, the nonparametric Wilcoxon's test for paired data was used to analyze the influence of entire competitive season on PT, MP, DNDR, AAR, and CR. The significance

TABLE 3. Evolution of ratios along entire sportive season.*

	Concentric ratio									
	$(60^\circ \cdot s^{-1})$				$(240^\circ \cdot s^{-1})$				Eccentric/ concentric ratio (CR)	
	DNDR		AAR		DNDR		AAR		Dom	Ndom
	RQ	RH	Dom	Ndom	RQ	RH	Dom	Ndom		
Pre										
Mean	1.03	1.01	0.60	0.61	0.99	1.01	0.72	0.70	1.06	1.02
(\pm SD)	(0.1)	(0.3)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.2)	(0.2)
Post										
Mean	0.98	0.97	0.57	0.58	1.01	0.98	0.67	0.69	1.02	0.99
(\pm SD)	(0.1)	(0.2)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.2)	(0.2)
<i>p</i>	0.03	NS	NS	NS	NS	NS	0.01	NS	NS	NS
ES	S 0.44	–	–	–	–	–	M 0.65	–	–	–

*DNDR = dominant-nondominant ratio; AAR = agonist-antagonist ratio; CR = combined ratio (eccentric at $30^\circ \cdot s^{-1}$ of hamstring and concentric at $240^\circ \cdot s^{-1}$ of quadriceps); Dom = dominant side; Ndom = nondominant side; Pre = precompetitive season; Post = postcompetitive season; *p* = significant values; NS = no significant; ES = effect size (Cohen's *d*) when significant difference was observed; S = small; M = moderate.

AU10

level was set at $p < 0.05$. When significant differences were found, effect size (ES) was assessed from the Cohen's d . Effect size of 0.20–0.60, 0.61–1.19, and ≥ 1.20 was considered small, moderate, and large, respectively (22). Statistical analyses were performed with the SigmaStat 3.1 program (Jandel Scientific, San Rafael, CA, USA).

RESULTS

Peak Torque

In concentric mode at $60^\circ \cdot s^{-1}$, PT showed a significant ($p < 0.001$) decrease in Q for dominant leg compared with non-dominant leg throughout the competitive season (Figure 3). However, at $240^\circ \cdot s^{-1}$, no significant difference was observed in Q and H for both dominant and nondominant legs. In eccentric mode at $30^\circ \cdot s^{-1}$, the present results showed no significant difference for both dominant and nondominant legs. The Cohen's d ES was 0.19 (small) in Q and 0.38 (small) in H at $60^\circ \cdot s^{-1}$.

Mean Power

In concentric mode at $60^\circ \cdot s^{-1}$, the results of the present study showed no significant difference in Q and H for both sides throughout the season (Figure 4). At $240^\circ \cdot s^{-1}$, no significant difference was observed in Q for both dominant and nondominant legs and in H for only nondominant leg. In contrast, a significant decrease ($p < 0.001$) was observed in H for dominant leg. In eccentric mode at $30^\circ \cdot s^{-1}$, a significant increase ($p < 0.001$) was observed for both dominant and nondominant legs. The Cohen's d ES was 0.44 (small) in H at $240^\circ \cdot s^{-1}$ for dominant side, 0.10 (small) in H at $30^\circ \cdot s^{-1}$ for dominant side, and 0.15 (small) in H at $30^\circ \cdot s^{-1}$ for non-dominant side.

Dominant-Nondominant, Agonist-Antagonist, and Combined Ratios

In concentric mode at $60^\circ \cdot s^{-1}$, a significant decrease was observed in Q ($p < 0.03$) for DNDR (Table 3). A significant decrease in AAR was observed at $240^\circ \cdot s^{-1}$ for dominant side ($p < 0.01$). No significant change was observed in CR.

DISCUSSION

This study aimed at evaluating the eventual change in muscular isokinetic parameters of the lower limbs in world-class handball players over a full competitive season. In concentric mode, except for PT values at $60^\circ \cdot s^{-1}$ on Q and MP values at $240^\circ \cdot s^{-1}$ on H for dominant side, which show a significant decrease, the general trend of the present results show that 39 weeks of high-intensity training and competition levels did not induce significant changes in strength and muscle power values of the knee joint, validating the experimental hypothesis.

The present results reflect those of Silva et al. (39) showing that professional soccer players participating in competitions maintain the isokinetic Q and H strength values at their initial values. The results are also in agreement with

the study of Eniseler et al. (10), performed with Turkish professional footballers of the Super League level, that did not show significant effects of a 24-week training and competition period on PT values measured at $60^\circ \cdot s^{-1}$ or on maximum strength tested at high angular velocities (300 and $500^\circ \cdot s^{-1}$). The general trend of the present results could be explained by the variety of physical movements required by handball training, which involve the simultaneous development of several physical qualities. The high-level handball training requires strength and power, particularly of the lower limbs, and endurance via aerobic energy metabolism pathway solicitation (30). Because of this, endurance training sessions are regularly planned (Table 2) during a season, and they can significantly interfere with the development of strength (14) and muscular power. Some studies have shown that strength gains are inhibited by the addition of endurance training sequences (8,19,42), mainly because of a physiological interference between 2 signaling pathways. Strength training stimulates pathway of growth factors like insulin-like growth factor-1, thereby optimizing protein synthesis and thus the increase in strength and hypertrophy: mammalian-mechanistic target of rapamycin. However, endurance training stimulates the metabolism of carbohydrates and fatty acids: AMPK (metabolic activated protein kinase), which inhibits mammalian-mechanistic target of rapamycin and thus limits these training responses (6,33). Another explanation could be put forward to explain the general trend of the results of the present study. Indeed, the handball players studied were world-class athletes and according to the work of Hakkinen et al. (18), training-related adaptations are mainly dependent on the athlete's pretraining level. Because the studied physical qualities of handball players are already elevated, the amelioration of these qualities would be less important.

The end-of-season values observed in the present study therefore showed that the regular practice of handball ($n = 180$ technical-tactical sessions and $n = 60$ games sessions), associated with strength training sessions ($n = 35$) and endurance training sessions ($n = 25$), without Pc2P (Table 1) (a) allows to maintain isokinetic strength parameters (PT and MP at 60 and $240^\circ \cdot s^{-1}$) in Q and H for nondominant leg and (b) induced a significant decrease in PT values ($p < 0.001$) on dominant leg in concentric mode at $60^\circ \cdot s^{-1}$ in Q. At the high-competition level, many passes and throws (jump throw, standing throw, diving throw, and standing throw with run-up) are made during technical-tactical training sessions and games sessions (32,34). Like most broken-off throws (10), a throw or a pass in handball favors the exclusive use of a single arm (dominant side) and the use of the opposing leg (nondominant side). That is also true concerning one-on-one action (32), involving a dynamic lateral thrust during which the player most often uses the opposing lower limb (nondominant) to the hand carrying the ball (12). From a biomechanical point of view, this motor organization allows for better balance and thus a better force transference

(45). The pelvis and the trunk can also pivot better and therefore induce a greater angular velocity in the acceleration phase of the hand carrying the ball (46). This motor organization allows a better automation of the coordination between the race, the jump, and the throw (12,46). However, this also induces a greater muscular exertion on the lower nondominant leg, explaining in part the maintenance of these strength indices at their initial levels.

Various explanations can be taken into consideration to justify the significant decrease in PT values at $60^\circ \cdot s^{-1}$ in Q for the dominant side. First, the dominant side was exerted less during throws, passes, and one-on-one action regularly practiced in handball. In handball, each action like a jump and explosive throw is performed with only 1 leg (15). This specific motor skill could partly explain the significant decrease observed on the dominant side at the end of the competitive season. This significant decrease could be offset by regular muscle strengthening sessions, but the quantity of these sessions was probably insufficient during the competitive season (Figure 1). Indeed, during a sports season, an elite-level handball team plays games at a consistent interval with an average of 2 matches per week for a total of approximately 60 official matches spanning through the national championship, the national cups, the European league, and the trophy of the champions. In addition to these matches, the players performed 180 training sessions focused on technical and tactical work. This framework specialized for high-level handball limits the time devoted to physical capacity development and, more particularly, the time devoted to the strength muscular quality development (21,38,40).

The MP values show a significant decrease ($p < 0.001$) on dominant side, in H during concentric mode at $240^\circ \cdot s^{-1}$ and a significant increase ($p < 0.001$) on dominant and nondominant sides in H at $30^\circ \cdot s^{-1}$. These results showed that the permanent H exertion under maximum tension during game actions, such as changes of direction, accelerations, and decelerations (41), did not maintain the value of $240^\circ \cdot s^{-1}$ on the dominant leg, which required less exertion by the specific motor organization. Second, to optimize the efficiency of these actions and to prevent injury in the athlete as much as possible, an appropriate program was offered throughout the competitive season. This program included targeted and individualized exercises that were performed in all contraction modes. Most often these exercises were performed in eccentric mode to reproduce the phase of lengthening found in numerous phases of fast accelerations with stops, short sprints with change in direction (2), which are regularly involved in the muscular injuries of the lower limbs. This would explain the significant increase ($p < 0.001$) observed in H at $30^\circ \cdot s^{-1}$.

During the actual investigation, we also studied AAR, DNDR, and CR. Authors such as Croisier et al. (4) showed that muscle strength of knee flexors and extensors should be well balanced to reduce the risk of injuries at the level of lower limbs. The results of the present study show

a significant decrease in AAR ($p < 0.01$) on dominant side at $240^\circ \cdot s^{-1}$. This result supports the hypothesis according to which the handball player's motor skill of a cross-chain coordination between the carrying arm of the ball and the opposite foot requires far less exertion on the dominant side. However, the end-of-season ratio remained within normal. It was in range of the theoretical reference value (between 0.6 and 0.7) in concentric mode (3,24).

The DNDR showed a significant decrease at $60^\circ \cdot s^{-1}$ in Q ($p < 0.03$). However, the value of this ratio measured at the end of the competitive season remains close to 1.0. This value represents the reference standard from a functional and clinical point of view (3), although there is controversy over the notion of bilateral knee strength balance (44). Indeed, some authors (13,43) consider that a difference of more than 10% between values on one side compared with the other can be considered an imbalance. This is not the case in regard to the results of the present study, which indicated that regular practice of handball does not alter the muscle ratios.

Concerning CR, the present results did not show significant changes between the beginning and the end of the competitive season, with values located around 1.0 (1.02 vs. 0.99), considered as a reference value (43). The longitudinal follow-up of injuries, performed by the medical staff based on the quantification of the lower limbs injuries, showed 2 time frames during which injuries increased: from November to December and from March to April (Figure 2). This observation should serve as a basis for the analysis of preventive musculoskeletal disorders frequently encountered in high-level athletes and, as far as possible, should encourage all coaches to individually manage their athletes' preparation in relation to their muscular profile.

One limitation of this study is that muscle groups were tested using an isokinetic dynamometer with a monoarticular approach, although sports are played in a closed system, suggesting that several muscle groups contribute to athletic performance. Finally, it would have been interesting to carry out another midseason assessment to have intermediate control over the evolution of values. The inherent constraints for a team at this competition level (2 games per week) and the international calendar have failed to achieve this goal. Moreover, it was impossible to establish a control group with regard to the elite level of the team.

PRACTICAL APPLICATIONS

Given the general trend of the present results, which show that a full competitive season for world-class handball players did not induce significant changes in strength and muscle power values of the knee joint, it would be very interesting to increase these values at the beginning of the season to keep these high values as long as possible during the season. In team sports at highest level of practice, the most appropriate period to increase strength and muscle power is Pc2P (31), which lasts from 6 to 8 weeks depending

on the sport discipline. As advised by the authors, intensive development of strength and power during Pc2P would maximize long-term effects, delaying a too fast and important decrease of strength and power values. In addition, despite the increase of matches on the calendar and to avoid falling values from decreasing and allowing an increase rather than a maintenance, a regular integration of strength training sessions during competition periods becomes a necessity. It could be done at the expense of some specific technical and tactical sessions not to add workload to the athletes. Finally, given (a) the importance of action, such as jumping, regularly found on the lower limbs in the specific actions of handball player at a higher level of competition and (b) the correlations observed between isokinetic strength values of knee extensors and vertical jump values (36), it could be also interesting to integrate, specific handball training and exercises that aim at maintaining the qualities of strength and muscle power. The vertical and horizontal jumping exercises, using the plyometric muscle contraction (which promotes intermuscular coordination) would make it possible to maximize the levels of strength and power of handball players.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the professional handball players for their participation in this research. The authors have no financial or conflicts of interest to disclose. The results of the present study do not constitute endorsement by the National Strength and Conditioning Association.

REFERENCES

1. Antonio, J and Ciccone, V. The effects of pre versus post workout supplementation of creatine monohydrate on body composition and strength. *J Int Soc Sports Nutr* 10: 36, 2013. **AU6**
2. Buchheit, M, Haydar, B, and Ahmaidi, S. Repeated sprints with directional changes: Do angles matter? *J Sport Sci* 30: 555–562, 2012.
3. Coombs, R and Garbutt, G. Developments in the use of the hamstring/quadriiceps ratio for the assessment of muscle balance. *J Sports Sci Med* 1: 56–62, 2002.
4. Croisier, JL, Forthomme, B, Namurois, MH, Vanderthommen, M, and Crielaard, JM. Hamstring muscle strain recurrence and strength performance disorders. *Am J Sports Med* 30: 199–203, 2002.
5. Delextrat, A and Cohen, D. Physiological testing of basketball players: Toward a standard evaluation of anaerobic fitness. *J Strength Cond Res* 22: 1066–1072, 2008.
6. Docherty, D and Sporer, B. A proposed model for examining the interference phenomenon between concurrent aerobic and strength training. *Sports Med* 30: 385–394, 2000.
7. Drouin, JM, Valovich-mcLeod, TC, Shultz, SJ, Gansnedter, BM, and Perrin, DH. Reliability and validity of the Biodex system 3 pro isokinetic dynamometer velocity, torque and positions measurements. *Eur J Appl Physiol* 91: 22–29, 2004.
8. Dudley, GA and Djamil, R. Incompatibility of endurance and strength-training modes of exercise. *J Appl Physiol* 59: 1446–1451, 1985.
9. Durnin, J and Rahaman, M. The assessment of the amount of fat in the human body from measurements of skinfold thickness. *Br J Nutr* 21: 681–689, 1967.
10. Eniseler, N, Sahan, C, Vurgun, H, and Mavi, HF. Isokinetic strength responses to season-long training and competition in Turkish elite soccer players. *J Hum Kinet* 31: 159–168, 2012.
11. Fleisig, GS, Barrentine, SW, Escamilla, RF, and Andrews, JR. Biomechanics of overhand throwing with implications for injuries. *Sports Med* 21: 421–437, 1996.
12. Fradet, L, Botcazou, M, Durocher, C, Cretuel, A, Multon, F, Prioux, J, and Delamarche, P. Do Handball throws always exhibit a proximal to distal segmental sequence? *J Sports Sci* 22: 439–447, 2004.
13. Fousekis, K, Tsepis, E, and Vagenas, G. Lower limb strength in professional soccer players: Profile, asymmetry and training age. *Sports Sci Med* 9: 364–373, 2010.
14. Fyfe, JJ, Bishop, DJ, and Stepto, NK. Interference between concurrent resistance and endurance exercise: Molecular bases and the role of individual training variables. *Sports Med* 44: 743–762, 2014.
15. González-Ravé, JM, Juárez, D, Rubio-Arias, JA, Clemente-Suarez, VJ, Martínez-Valencia, MA, and Abian-Vicen, J. Isokinetic leg strength and power in elite handball players. *J Hum Kinet* 8: 227–233, 2014.
16. Gorostiaga, EM, Granados, C, Ibañez, J, González-Badillo, JJ, and Izquierdo, M. Effects of an entire season on physical fitness changes in elite male handball players. *Med Sci Sport Exer* 38: 357–366, 2006.
17. Granados, C, Izquierdo, M, Ibanez, J, Ruesta, M, and Gorostiaga, EM. Effects of an entire season on physical fitness in elite female handball players. *Med Sci Sport Exer* 40: 351–361, 2008.
18. Hakkinen, K, Pakarinen, A, Alen, M, Kauhanen, H, and Komi, PV. Neuromuscular and hormonal adaptations in athletes to strength training in two years. *J Appl Physiol* 65: 2406–2412, 1988.
19. Hennessy, LC and Watson, AWS. The interference effects of training for strength and endurance simultaneously. *J Strength Cond Res* 8: 12–19, 1994.
20. Hoffman, JR, Fry, AC, Howard, R, Maresh, CM, and Kraemer, WJ. Strength, speed and endurance changes during the course of a division 1 basketball season. *J Strength Cond Res* 5: 144–149, 1991.
21. Holm, J, Fosdahl, MA, Friis, A, Risberg, MA, Mykelebus, G, and Steen, H. Effect of neuromuscular training on proprioception, balance, muscle strength and lower limb function in female team handball players. *Clin J Sports Med* 14: 88–94, 2004.
22. Hopkins, WG, Marshall, SW, Batterham, AM, and Hanin, J. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sport Exer* 41: 3–13, 2009.
23. Jidovtseff, B. *Mise au point d'un dynamomètre spécifique de la puissance musculaire [PhD thesis]*. Université de Liège, Faculté de médecine; 2006. **AU7**
24. Johnson, RD and Levine, B. Reliability of the Biodex B 2000 isokinetic dynamometer. *Phys Ther* 68: 792, 1988.
25. Kannus, P. Isokinetic evaluation of muscular performance: Implications for muscle testing and rehabilitation. *Int J Sports Med* 15: 11–18, 1994.
26. Karcher, C and Buchheit, M. On-court demands of elite handball, with special reference to playing positions. *Sports Med* 44: 797–814, 2014.
27. Knapik, JJ and Ramos, MU. Isokinetic and isometric torque relationships in the human body. *Arch Phys Med Rehabil* 61: 64–67, 1980.
28. Kraemer, WJ, French, DN, Paxton, NJ, Hakkinen, K, Volek, JS, Sebastianelli, WJ, Putukian, M, Newton, RU, Rubin, MR, Gomez, AL, Vescovi, JD, Ratames, NA, Fleck, SJ, Lynch, JM, and Knuttgen, HG. Changes in exercise performance and hormonal concentrations over a big ten soccer season in starters and nonstarters. *J Strength Cond Res* 18: 121–128, 2004.
29. Leger, LA and Lambert, J. A maximal multistage 20-m shuttle run test to predict VO₂ max. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 49: 1–12, 1982.
30. Marques, MC and Gonzales-Badillo, JJ. In season resistance training and detraining in professional team handball players. *J Strength Cond Res* 20: 563–571, 2006.

- AU8** 31. Maurelli, O, Bernard, PL, Dubois, R, Ahmaidi, S, and Prioux, J. Effects on the competitive season on the isokinetic muscles parameters change in world class handball players. *J Strength Cond Res*, 2017. doi: 10.1519/JSC.0000000000002199.
32. Michalsik, LB, Madsen, K, and Aagaard, P. Physiological capacity and physical testing in male elite team handball. *J Sport Med Phys Fit* 55: 415–429, 2015.
33. Nader, GA. Concurrent strength and endurance training: From molecules to man. *Med Sci Sport Exer* 38: 1965–1970, 2006.
34. Povoas, SCA, Ascensao, AAMR, Magalhaes, J, Seabra, AF, Krstrup, P, Soares, JMC, and Rebelo, ANC. Physiological demands of elite team handball with special reference to playing position. *J Strength Cond Res* 8: 430–442, 2014.
35. Rochcongar, P. Isokinetic thigh muscle strength in sports: A review. *Ann Readapt Med Phys* 47: 274–281, 2004.
36. Saliba, L and Hrysomalis, C. Isokinetic strength related to jumping but not kicking performance of Australian footballers. *J Sci Med Sport* 4: 336–347, 2001.
37. Samozino, P, Morin, JB, Hintzy, F, and Belli, A. A simple method for measuring force, velocity and power output during squat jump. *J Biomech* 41: 2940–2945, 2008.
38. Schneider, V, Arnold, B, Martin, K, Bell, D, and Crocker, P. Detraining effects in college football players during the competitive season. *J Strength Cond Res* 12: 3–63, 1988.
39. Silva, JR, Magalhaes, JF, Ascensao, AA, Oliveira, EM, Seabra, AF, and Rebelo, AN. Individual match playing time during the season affects fitness related-parameters of male professional soccer players. *J Strength Cond Res* 25: 2729–2739, 2011.
40. Silva, JR, Magalhaes, JF, Ascensao, AA, Seabra, AF, and Rebelo, AN. Training status and match activity of professional soccer players throughout a season. *J Strength Cond Res* 27: 20–30, 2013.
41. Stølen, T, Chamari, K, Castagna, C, and Wisloff, U. Physiology of soccer. *Sports Med* 35: 501–536, 2005.
42. Tanaka, H and Swensen, T. Impact of resistance training on endurance performance. *Sports Med* 25: 191–200, 1998.
43. Thorstensson, A, Grimby, G, and Karlsson, J. Force-velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles. *J Appl Physiol* 40: 12–16, 1976.
44. Tol, JL, Hamilton, B, Eirale, C, Muxart, P, Jacobsen, P, and Whiteley, R. At return to play following hamstring injury the majority of professional football players have residual isokinetic deficits. *Br J Sports Med* 48: 1364–1369, 2014.
45. Van Den Tillar, R and Ettema, G. Is there a proximal to distal sequence in overarm throwing in team handball? *J Sports Sci* 27: 949–955, 2009.
46. Wagner, H, Pjusterschmied, J, Von Duvillard, SP, and Müller, E. Performance and kinematics of various throwing techniques and skill levels in team-handball. In: EHF Scientific Conference: Science and analytical expertise in handball, 2011. pp. 331–335. **AU9**
47. Wagner, H, Finkenzeller, T, Von Wurth, S, and Von Duvillard, SP. Individual and team performance in team-handball: A review. *J Sport Sci Med* 13: 808–816, 2014. **AU3**

Etude 3

1 **Effects of an entire season on physical, biological and**
2 **psychological changes in world-class male handball players**

3
4 **Section:** Original Investigation

5
6 **Authors:** Olivier Maurelli¹, Lars Bojsen Michalsik², Laurent Schmitt³, Romain Dubois⁴, Jean
7 Frederic Brun⁵, Said Ahmaidi¹, Jacques Prioux^{6,7}

8
9 **Affiliations:**

10 ¹Exercise physiology and rehabilitation laboratory (EA-3300 : APERE), Faculty of Picardie
11 (Amiens).

12 ²

13
14 ³

15
16 ⁴ Laboratory of Physical Activity, Health and Performance" (EA 4445), University of Pau & Pays
17 Adour, Tarbes, France

18 ⁵

19 ⁶ Movement, Sport and Health laboratory (EA 1274), Faculty of sport science (Rennes), University of
20 Rennes 2, F-35000 Rennes, France.

21 ⁷ Department of Sport Sciences and Physical Education, ENS Rennes, Campus de Ker Lann, F-35170
22 Bruz, France.

23
24 **Corresponding Author:**

25 Olivier Maurelli

26 3040 route de Mende, 34980 Monferrier sur Lez, France

27 Email: oliviermaurelli@gmail.com

28 Phone number: 33 6 14 40 79 65

29
30 **Running Head:** Physiological and psychological responses during competitive handball season

31
32 **Abstract word count:** 472

33 **Text only word count:** 7672

34 **Number of tables:** 7

35 **Number of figures:** 4

37 **ABSTRACT**

38 **Purpose:** The aim of the present study was to analyze influence of training and games
39 sessions during a entire season on the physical, biological and psychological characteristics in
40 world-class handball players. **Methods:** Thirteen male international professional players (age:
41 26.6 ± 5.4 y) were recruited in the study. Four types of tests (4 blood samples, 5 field tests, 5
42 measurements of heart rate variability and weekly assessments from psychological
43 questionnaire) were performed over a competitive season. 4 major periods were identified,
44 within which some tests were set up. The first period is between week-1 (start of the season)
45 and week-8 (end of pre-competitive preparation period (Pc2P), the second period going from
46 week-9 (after Pc2P) to week-20 (in november), the third period going from week-21 to week-
47 32 (in march) and the last period going from week-33 to the end of the season in week-47 (in
48 june). **Results:** Mean handball training time per week values are significantly higher ($p <$
49 0.05) in T4-T5 compared to T1-T2, T2-T3 and T3-T4. H values are lower ($p < 0.05$) in T4
50 compared to T1, T3 and T5, [F]sg is lower ($p < 0.05$) in T5 compared to T1, T3 and T4 and in
51 T4 compared to T1. [C]sg is lower ($p < 0.05$) in T5 compared to T1, T3 and T4 whereas [T]sg
52 is higher ($p < 0.05$) in T5 compared to T1, T3, T4, in T4 compared to T3 and in T1 compared
53 to T3. IGF-1 is lower ($p < 0.05$) in T5 compared to T1, T3, T4 and in T4 and T3 compared to
54 T1. Hooper Stress score is higher ($p < 0.05$) in T2 and T5 compared to T1. Fatigue and sleep
55 scores are higher ($p < 0.05$) in T2 compared to T1, T3 and T5. HRV values show that HR is
56 higher ($p < 0.05$) in T1 and T5 compared to T2, T3 and T4. HF and TP are higher ($p < 0.05$)
57 in T3 compared to T1, T2, T4 and T5. In standing position, HR is higher ($p < 0.05$) in T1
58 compared to T2, T3, T4 and T5. LF is higher ($p < 0.05$) in T3 compared to T1, T2, T4, T5, in
59 T1 compared to T2 and T4 and in T5 compared to T1. HF is lower ($p < 0.05$) in T1 compared
60 to T2, T3, T4 and T5. LF+HF are higher ($p < 0.05$) in T3 compared to T1, T2, T4 and T5, in
61 T1 compared to T2 and in T4 and T5 compared to T1. Finally, the mean values of TP are
62 higher in T3 compared to T1, T2, T5, in T4 compared to T3, in T1 compared to T2 and T5
63 and in T4 compared to T1.

64 **Conclusions:** This study seems to provide information concerning physical, biological and
65 psychological adaptations relationships in world-class handball players throughout a season.

66

67 **Keywords:** Team sport, blood samples, heart rate variability, entire season

68

69

70

1. INTRODUCTION

71
72
73 Handball is a team sport played on a 40 x 20 m field and requires players, except the
74 goalkeeper, to play an average distance of 4370 ± 702 m (Povoas et al., 2014). The practice
75 requires a wide variety of actions such as jumps, sprints, changes of direction and shooting
76 during an effective playing time of 52.36 ± 5.92 min for an elite men's team (Michalsik et al.,
77 2015). Since the arrival of professionalism in 2003, the seasons has lengthened with an
78 increase of intensive periods of training and competition showing fatigue of the players,
79 which can be linked to non-functional adaptations (injuries, reduced wellness and
80 performance, biological disturbances...) (Banfi et al., 2006; Gorostiaga et al., 2006; Nunes et
81 al., 2014). In order to better understand these changes and their effects, it becomes essential to
82 monitor athletes longitudinally using samples from several markers.

83 Quantify the training load (TL), imposed by the training and competitive sessions, constitutes
84 a fundamental step to understand the dose-response between the playing and training stress
85 and physiological adaptations (Banister and Hamilton, 1985; Halson, 2014). The monitoring
86 of TL can be done from objective and/or subjective markers (Borressen and Lambert, 2008).
87 In team sport, TL is complex to apprehend because the periods of competitions are long,
88 matches are close and the number of athletes to manage is large (Gabbett, 2016). External
89 training load (ETL) can be performed using different techniques such as video tracking
90 (Sibila et al., 2004), global positioning system (GPS) technology (Malone et al., 2015),
91 accelerometers or simply time spent in training (Gorostiaga et al., 2006). To monitor internal
92 training load (ITL), some studies have focused on physiological and/or biological markers.
93 The most common biological markers found in the literature are testosterone ([T]sg) and
94 cortisol ([C]sg) plasma concentrations (Fry et al., 1991). Since, other biological markers have
95 been investigated such as hematocrit (H) assay in rugby (Banfi et al., 2006) or creatine kinase
96 ([CK]sg) and ferritin ([F]sg) plasma concentration in football (Sanchis-Gomar et al., 2015).
97 Other works, using biological markers, has focused on the somatotrophic axis with insulin-like
98 growth factor-1 (IGF-1) and insulin growth factor binding protein 3 (IGFBP-3) in rugby
99 (Elloumi et al., 2005). Among the physiological markers, the use of heart rate variability
100 (HRV) is a tool increasingly used in training to objectify a state of fitness or a type of fatigue
101 in well trained triathletes (Le Meur et al., 2013), elite swimmers (Schmitt et al., 2016) or elite
102 nordic skiers (Schmitt et al., 2015). Other studies have attempted to monitor ITL from
103 subjectives markers like Hooper (Charlot et al., 2015) or RESTQ-Sport questionnaires
104 (Gonzales-Boto et al., 2008). Some studies have attempted to find relationships between the
105 objectives (Cortisol and Testosterone) and subjectives (overtraining questionnaire) markers to

106 define an athlete's fitness status (Elloumi et al., 2008; Crewther et al., 2009; Gaviglio et al.,
107 2014). These studies have focused on one or two isolated markers, but few studies have
108 focused on longitudinal monitoring of several types of markers for an entire season in team
109 sports (Clarke et al., 2013; Dubois et al., 2017). Finally, the effects of an entire season on the
110 physical, biological and psychological characteristics of professional handball players remain
111 relatively unknown. To our knowledge, only two studies (Gorostiaga et al., 2006, Bresciani et
112 al., 2010) have monitored a full season in male handball players. Gorostiaga et al. (2006), in
113 elite handball players, studied variations in physical performance as a function of training
114 volume and intensity. Bresciani et al. (2010), in handball players who competed in a national
115 level handball league competition, have monitored ETL (from the session RPE (sRPE)
116 method) and ITL using biological markers of inflammation (C-reactive protein) and oxidative
117 stress (reduced and oxidized glutathione) coupled with subjective mood state (POMS) and
118 recovery (RESTQ-Sport) questionnaires. None of these studies examined the relationship
119 between player activity and injury. Furthermore, no studies used a set of objectives and
120 subjective markers such as HRV and Hooper questionnaire to estimate the ITL of elite
121 athletes over an entire competitive season. Understanding the dose-response relationship
122 helps to optimize training process to better prevent non-functional adaptations while allowing
123 players to achieve high performance throughout the season. Studies examining this
124 relationship over an entire competitive season are a fundamental step in understanding the
125 optimal training prescription for athletes. In relation of these different studies, it becomes
126 interesting to multiply the markers in the longitudinal monitoring of world-class handball
127 players. Consequently, the aims of this study, were (i) to monitor ETL measured from time
128 spent on specific training, games and also strength and endurance development, (ii) to study
129 changes in physical, biological, and psychological markers, and (iii) to explain how ETL
130 influences players' physical, biological and psychological responses and number of lower and
131 upper limb injuries during a season. Our hypothesis was that the time spent training and
132 playing during a competitive season led to an alteration of ITL markers that could lead to
133 fitness drops or injuries among world-class handball players.

134

135

2. METHODS

136

137 **Subjects**

138 Thirteen male handball players (age: 26.6 ± 5.4 years; height: 189.5 ± 5.1 cm; body mass:
139 95.9 ± 12.8 kg; fat mass: 10.5 ± 2.1 %), either French or foreign, participated in this study.

140 Inclusion criteria were the following: being a male and being under contract for a minimum of
141 3 years. Prior to participation in the championship and in compliance with the
142 recommendations of the Declaration of Helsinki, all players received comprehensive oral and
143 written explanations about the study and gave their written informed consent to participate.
144 The study was approved by the ethics committee of the local university and were carried out
145 in agreement with the head doctor and validated by the medical committee of the club. Before
146 starting the study, the players had a physical examination by the team doctor, and each of
147 them was ruled out of any medical condition that might limit their participation. The subjects
148 and the coach were informed about the experimental procedures and potential risks and
149 benefits of the project. The players were do not take exogenous or other anabolic and
150 androgenic steroids, drugs or substances expected to affect physical performance or hormonal
151 balance in this study.

152

153 **Testing schedule**

154 A longitudinal study was performed throughout a professional handball season in one of most
155 famous national championship in the world. The 47-weeks season consisted of 2 pre-
156 competitive preparation periods (Pc2P1 - weeks 1 to 8 and Pc2P2 - weeks 28 to 30), two
157 competitive periods (weeks 9 to 25 and weeks 31 to 47) and one rest period (weeks 26 and
158 27). Throughout the season, (i) the time spent on the field, in training and matches, and also
159 time spent to the development of strength and endurance, was monitored individually for all
160 players and (ii) the players were tested on several occasions (Figure 1). For field tests, players
161 were tested on 5 occasions: the first test (FT1) was performed in week-1, the second (FT2) in
162 week-14, the third (FT3) in week-20, the fourth (FT4) in week-33 and the fifth test (FT5) was
163 performed in week-47. Biological samples took place on 4 occasions: the first (BS1) was
164 performed in week-1, the second (BS2) in week-20, the third (BS3) in week-33 and the fourth
165 (BS4) was performed in week-47. HRV measures took place on 5 occasions: the first
166 measures (HRV1) was performed in week-1, the second (HRV2) in week-9, the third (HRV3)
167 in week-20, the fourth (HRV4) in week-33 and the fifth (HRV5) in week-47. Anthropometric
168 measurements and Hooper questionnaire were performed weekly. For the Hooper
169 questionnaire, anthropometric measurements, blood samples and HRV tests, participants were
170 assessed at the same time of the day between 09:00 and 11:00 h am and were always gone in
171 the same order: first the HRV test, after the Hooper questionnaire, then anthropometric
172 measurements and finally blood samples. The field tests were carried out the first training day
173 of the week at the club, between 4 pm and 6 pm before the physical preparation training or the

174 specific handball training. For the field tests, the subjects were familiarized with the testing
175 protocols because they had been tested on several occasions in previous seasons. A 24-hour
176 rest period was respected after the last training or match session in order to avoid any major
177 bias. Evaluations were always performed in the same order during the testing sessions, each
178 subject was first subjected to vertical jump tests, speed tests and finally an aerobic maximal
179 velocity test. Subjects were strongly verbally encouraged to perform all tests as best they
180 could.

181

182

INSERT FIGURE 1

183

184 During the sports season, players have trained to develop or maintain their physical qualities,
185 necessary for the practice of handball at a very high level of competition. Different objectives
186 were planned for strength and endurance development according to the annual competition
187 calendar and fixed by the main coach (Table 1). The priority was to maintain a high level of
188 performance over 47 weeks. For this, an important physical work around strength and
189 endurance development was set up in Pc2P. Subsequently, the sequence of training and
190 matches sessions limited the physical work. From the end of Pc2P (week 8) to the end of the
191 first part of the competitive period (week 25), training focused primarily on power and
192 explosivity development thus the repeated sprint ability. The second part of the competitive
193 period is often synonymous with final phases in different competitions (European Cup,
194 French Cup, League Cup, French Championship). For that, the sessions were scheduled based
195 on maximum strength and aerobic power to go towards explosivity and repeated sprint ability.
196 Maximum strength training was conducted around 90% of 1-RM intensity. The power was
197 achieved at intensities of 50-60% of 1-RM and the explosivity was achieved at intensity
198 around 30% of 1-RM at maximum speed. Aerobic capacity development was performed at
199 intensities between 65 and 75% of maximum aerobic velocity (MAV). Aerobic power was
200 planned at intensity between 100 and 110% of MAV. Finally, the anaerobic power and
201 repeated sprint sessions were tested at maximum intensity (sprint).

202

203

INSERT TABLE 1

204

205 **Training and competition data analysis during entire season**

206 During the season, the coaches recorded the individual match and training time exposure (i.e.,
207 player participation for every training and competition session, including the duration of each
208 activity). Individual training volume was determined as the amount of time each player

209 participated in each activity. Monitoring included an inventory of the number and nature of
210 training sessions (Figure 2) performed by all players during the different periods of the
211 season. Furthermore, the monitoring included a follow-up (in minutes) of training and match
212 time, as well as the strength and endurance training time.

213

214

INSERT FIGURE 2

215

216 **Anthropometric characteristics**

217 The anthropometric variables of height (m), body mass (kg) and body fat (%) were measured
218 for each subject. Height was measured by a toise Tanita (HR001 ; Tanita Corp., Tokyo,
219 Japan). Body mass was measured with the players wearing light indoor clothing and no shoes,
220 using a Tanita Body Analysis (TBF-3000 ; Tanita Corp., Tokyo, Japan). Percentage of body
221 fat was estimated from four skinfolds thicknesses (biceps, triceps, sub-scapular, and supra-
222 iliac), according to the method of Durnin and Rahaman (1967).

223

224 **Physical parameters**

225 Evaluations consisted of vertical jump tests (squat jump (SJ) and counter movement jump
226 (CMJ)), running speed test on a 5 meters start-stop (5m SS) and aerobic maximal velocity test
227 (shuttle-run 20m). In order to minimize risk of injury, players followed a standardized warm-
228 up protocol that included 10 min of footing, athletic ranges, dynamic active stretching and
229 progressive sprints.

230

231 Vertical jump tests: To perform these tests, we used an Optojump (Optojump next, Microgate,
232 Bolzano, Italy). The protocol of the jump tests was standardized and players were familiar
233 with the test protocol. For SJ, the players, when ready, come down to an angulation of the
234 knees at 90° (goniometer controlled). At this angulation, they marked a downtime and
235 realized a vertical jump as high as possible (Young et al., 1997). They had to land with both
236 feet at the same time, without hip flexion during the suspension and without bending the
237 knees before landing. For CMJ, players, made a counter movement to achieve a 90° knee
238 flexion followed by a triple extension to jump as high as possible (Young et al., 1997).
239 Players had to keep their hands on the hips throughout the movement so as not to help the
240 upper limbs. These tests were developed to measure jump height with an accuracy of 10⁻³
241 seconds for flight and ground contact times (Bosco and Komi, 1979). Players performed 3
242 repetitions per test with 10-sec rest between jumps and 45-sec rest between SJ and CMJ. The
243 best performance was retained.

244

245 Running speed test: For this test, we used Brower photocells (Brower Timing Systems,
246 Draper, Utah, USA). Before the test, players were familiar with the test protocol. The test
247 took place in the usual training gymnasium. The players stood motionless with their feet
248 behind the starting line (without touching the line with their feet). They chose their
249 preferential starting foot before the start and kept the same procedure during all the tests. The
250 running speed test assesses the acceleration ability of the player over 5 meters. Then, when it
251 was ready, player started to go as fast as possible the distance of 5 meters. Player performed 3
252 trials with one minute of recovery between attempts. The best performance was retained.

253

254 Aerobic maximal velocity test: All players performed this test until exhaustion. This test took
255 place in a handball gymnasium. During this test, players were verbally encouraged to run as
256 long as possible. Before the test, players were familiar with the test protocol. During this test,
257 the players have to chain the shuttles between two lines placed at 20 meters of distance from
258 each other. The race velocity was incremented by 0.5 km.h⁻¹ every minute. It was dictated by
259 audio signals from a tape recorder. The objective was to achieve as much back and forth as
260 possible. Player was stopped when, over 3 successive intervals, he was more than one meter
261 behind a round-trip (Leger et al., 1988). This test give MAV expressed in km.h⁻¹.

262

263 **Biological parameters**

264 Blood samples were taken in the morning on an empty stomach at the club. Hematological
265 examinations were performed by blood count to determine the nature of the cells present in
266 the blood and to quantify them, using an automated system. The concentration of H were
267 determined by immunoenzymatic method using an automated system (Horiba Pentra DX 120,
268 Horiba ABX, Montpellier, France). Biochemical examinations included [CK]sg and [F]sg
269 assay analysed by reflectometric method V 5600 Ortho Clinical Diagnostic (LRBM,
270 Montpellier, France). Analysis of hormonal concentrations included the dosage of [C]sg,
271 [T]sg, IGF-1 and IGFBP-3. [C]sg and [T]sg were assayed by Electro Chimiluminescence,
272 IGF-1 by Chimiluminescence and IGFBP-3 by ELISA (Biomnis, Lyon, France).

273

274 **Psychological parameters**

275 The Hooper questionnaire (Hooper et al., 1995) was used during this study. It's a 4-item
276 questionnaire that can be used to estimate fatigue, sleep quality, level of pain and stress.
277 Every week, on the first day of returning to the club, players informed the questionnaire. They

278 were assigned a rating of 1 (very positive feeling) to 7 (most negative feeling) of each of the
279 items presented above (Figure 3a et 3b).

280

281

INSERT FIGURE 3

282

283 **Heart rate variability parameters**

284 Heart rate variability data were recorded on players waking-up in the morning, before
285 breakfast and after 2-3 min of calm, lying on the floor, in a room without heaving hot and
286 cold. This relied on a-15 min RR interval recording at rest with 8 min supine (SU) followed
287 by 7 min standing (ST) (Schmitt et al., 2013). HRV analyses were performed on RR intervals
288 between the 3rd and 8th min supine, and between the 9th and 14th min standing. Measurements
289 of the interval duration between 2 R waves of the cardiac electrical activity was performed
290 with a HR monitor (Polar Team 2, Polar Electro, Oy, Kempele, Finland) (Schmitt et al.,
291 2015). Then, the spectral power was calculated with Fast Fourier Transform (FFT) according to
292 the specific software (Kubios[®], Kuopio, Finland). The spectral power was expressed in ms²
293 (Task Force, 1996) with high-frequency (HF) power band (0.15-0.40Hz) reflecting
294 modulation of parasympathetic influence to the heart and related to respiratory sinus
295 arrhythmia (Pomerantz et al., 1985) and low-frequency (LF) power band (0.04-0.15 Hz)
296 reflecting mainly the modulation of sympathetic influence to the heart. During the tests, the
297 investigator surveyed visually the breathing frequency and timed it with a frequency-meter,
298 because a very low rate, under 9 cycles per min, could shift frequencies lower than 0.15 Hz
299 and decrease the HF band or increase the LF band. The parameters retained and analysed
300 during SU and ST measurements were: LF, HF, LF+HF, Heart rate (HR), the root mean
301 square of the successive differences (RMSSD) of the R-R intervals and the total power (TP).

302

303 **Distribution of injury rates**

304 The medical staff of the club was responsible for identifying and documenting injury
305 occurrence and severity. Injuries with severity of less than 3 days were excluded from the
306 analyses. An injury was defined as any pain or disability experienced by a player on the lower
307 and upper limb during or following games or training sessions, which prevents a player from
308 training or playing normally for more than 3 days. As shown in Figure 4, injuries were
309 quantified monthly based on the total number of injury and injured players numbers during
310 the entire season.

311

312

INSERT FIGURE 4

313 **Statistical analyses**

314 More than 13928.8 ± 1543.1 min of average global training per player, including average
315 spent time training and playing per player (10804.6 ± 1468.6 min), average spent time in
316 strength training (1894.2 ± 140.7 min) and average endurance training with or without ball
317 (1230 ± 0 min) were examined throughout a 47-week season. A total of 65 performances of
318 the MAV test, 611 completed Hopper questionnaire, 52 blood samples, 65 HRV tests, 390 SJ
319 and CMJ measures and 156 anthropometrics characteristics were obtained and analysed.
320 Statistical analyses of the evolution of these previous parameters over the season, were carried
321 out between T1, T2, T3, T4 and T5 for HRV, anthropometrics characteristics and time spent
322 training and playing and between T1, T3, T4 and T5 for blood samples (Figure 1). T1 and T2
323 were respectively located at the beginning and at the end of Pc2P and T5 was located at the
324 end of the season. T3 and T4 were respectively located in December, (4 weeks before the end
325 of CP1) and in march (3 weeks after the beginning of CP2). Finally the statistical analyses of
326 the evolution of field tests, over the season, were carried out between FT1, FT2, FT3, FT4
327 and FT5 (Figure 1). FT1, FT3, FT4 and FT5 were located in the same places that T1, T3, T4
328 and T5. FT2 was located 5 weeks after the beginning of CP1. Data are presented as mean \pm
329 standart error of the mean (SEM). After conducting a test of normality by the Kolmogorov-
330 Smirnov test (with Lilliefors corrections), the values of dependent variables (biological
331 assays, field tests, HRV tests and Hooper questionnaire) were compared using a one-way
332 repeated measures ANOVA with 5 times. All the statistical analyses were carried out with
333 SigmaStat and all figure representations were achieved through SigmaPlot (version 9.0,
334 SYSTAT, USA). The level of significance for all statistical tests was set at $p \leq 0.05$. Linear
335 regression with Pearson's coefficients (r) were used to establish the potential relationships
336 between changes in blood samples, HRV, field tests and time spent at training and games.
337 The correlation coefficients were presented with 95% confidence interval (95% CI). The
338 magnitude of correlation (r) were assessed as follow: $r < 0.1$, trivial; $> 0.1-0.3$, small; $> 0.3-0.5$,
339 moderate, $0.5-0.7$, large; $> 0.7-0.9$, very large; $> 0.9-0.99$, nearly perfect and 1.0, perfect
340 (Hopkins et al., 2009).

341

342 **RESULTS**

343

344 **Anthropometric characteristics**

345 No significant difference was observed over the season concerning the body mass of our
346 subjects whereas the body fat is significantly ($p < 0.05$) lower in T2, T3, T4 and T5 compared
347 to T1 (Table 2).

348

349 *# INSERT TABLE 2 #*

350

351 **Physical training**

352 Characteristics of the physical training over the season are presented in table 3. Our results
353 show that the mean handball training time per week values are significantly higher ($p < 0.05$)
354 in T4-T5 compared to T1-T2, T2-T3 and T3-T4 whereas the mean values in T1-T2 and T2-T3
355 are significantly higher compared to T3-T4.

356

357 *# INSERT TABLE 3 #*

358

359 **Physical parameters**

360 The present results (Table 4) show that MAV, SJ and CMJ are significantly ($p < 0.05$) higher
361 in FT2, FT3, FT4 and FT5 compared to FT1 whereas 5m SS is significantly ($p < 0.05$) lower
362 in FT2, FT3, FT4 and FT5 compared to FT1.

363

364 *# INSERT TABLE 4 #*

365

366 **Biological parameters**

367 Our results (Table 5) show that H is significantly ($p < 0.05$) lower in T4 compared to T1, T3
368 and T5 and that [F]sg is significantly ($p < 0.05$) lower (i) in T5 compared to T1, T3 and T4
369 and (ii) in T4 compared to T1. Our results also show that [C]sg is significantly ($p < 0.05$)
370 lower in T5 compared to T1, T3 and T4 whereas [T]sg is significantly ($p < 0.05$) higher (i) in
371 T5 compared to T1, T3, T4 and (ii) in T4 compared to T3 and (iii) in T1 compared to T3.
372 Finally, IGF-1 is significantly ($p < 0.05$) lower (i) in T5 compared to T1, T3, T4 and (ii) in T4
373 and T3 compared to T1. No other significant differences were observed for IGFBP-3 and
374 [CK]sg mean values. Our results also show that H was significantly correlated with MAV (R
375 = 0.38, $p < 0.01$). There was also a significant correlation between [F]sg and MAV ($R = 0.36$,
376 $p < 0.01$), SJ ($R = 0.44$, $p < 0.001$) and CMJ ($R = 0.33$, $p < 0.01$). Finally, IGF-1 was
377 significantly correlated with SJ ($R = 0.44$, $p < 0.001$) and CMJ ($R = 0.34$, $p < 0.01$).

378

379 *# INSERT TABLE 5 #*

380

381 **Psychological parameters**

382 Table 6 shows the kinetics of the Hopper test scores measured at T1, T2, T3, T4 and T5. The
383 present results (Table 6) show that fatigue, sleep and stress scores are significantly ($p < 0.05$)
384 higher (i) in T4 compared to T1, T2, T3, T5 and (ii) in T3 and T5 compared to T1. Our results
385 also show that stress score is significantly ($p < 0.05$) higher (i) in T2 and T5 compared to T1
386 and (ii) in T3 compared to T2 and T5. Finally, our results show that fatigue and sleep scores
387 are significantly ($p < 0.05$) higher in T2 compared to T1, T3 and T5. Concerning pain score,
388 all the mean values are significantly different. Figure 3 shows the kinetics of Hooper scores
389 measured each week throughout the season. These results show two very significant increases
390 in scores between T1 and T2 and between T2 and T3. The peak values observed in week 4
391 (24.7 ± 1.0 between T1 and T2) and in weeks 12 (22.4 ± 1.7), 13 (22.8 ± 1.2) and 14 (22.6
392 ± 1.3) (between T2 and T3) are significantly higher than the scores measured in T2 ($14.8 \pm$
393 1.4) and T3 (12.3 ± 1.0) respectively. Finally, our results show a relatively gradual increase
394 in scores between T3 and T4 as well as a relatively gradual decrease in scores between T4 and
395 T5. In this framework, the Hooper scores in T4 (week 33) were the higher scores observed
396 between T3 (week 20) and T5 (week 47).

397

398

INSERT TABLE 6

399

400 **Description of heart rate variability responses**

401 In supine position (Table 7), the presents results show that HR is significantly ($p < 0.05$)
402 higher in T1 and T5 compared to T2, T3 and T4 and that HF and TP are significantly ($p <$
403 0.05) higher in T3 compared to T1, T2, T4 and T5. Our results also show that LF + HF are
404 significantly ($p < 0.05$) higher (i) in T3 compared to T1, T2, T4, (ii) in T5 compared to T1
405 and T2 and (iii) in T4 compared to T5. No other significant differences were observed for LF.
406 In standing position (Table 7), the presents results show that HR is significantly ($p < 0.05$)
407 higher in T1 compared to T2, T3, T4 and T5. Our results also show that LF is significantly (p
408 < 0.05) higher (i) in T3 compared to T1, T2, T4, T5 and (ii) in T1 compared to T2 and T4 and
409 (iii) in T5 compared to T1. HF is significantly ($p < 0.05$) lower in T1 compared to T2, T3, T4
410 and T5 whereas LF + HF are significantly ($p < 0.05$) higher (i) in T3 compared to T1, T2, T4
411 and T5 and (ii) in T1 compared to T2 and (iii) in T4 and T5 compared to T1. Finally, the
412 mean values of TP are significantly higher (i) in T3 compared to T1, T2, T5 and (ii) in T4
413 compared to T3 and (iii) in T1 compared to T2 and T5 and (iv) in T4 compared to T1.

414

3. DISCUSSION

415
416
417
418
419 The aim of this work was to study the evolution of physical, biological and psychological
420 parameters in high level handball players throughout a sports season. Our experimental
421 protocol consisted of 47 weeks of training and competition, divided into four periods (T1-T2,
422 T2-T3, T3-T4 and T4-T5). Our results shows that the average values of handball training time
423 expressed in minutes and per week are significantly ($p < 0.05$) higher at T4-T5 compared to
424 T1-T2, T2-T3 and T3-T4. They also show that these mean values are significantly ($p < 0.05$)
425 higher at T1-T2 and T2-T3 compared to T3-T4. The first period (T1-T2, Pc2P) is a crucial
426 period to prepare players for the competitive season (Murray et al., 2016; Maurelli et al.,
427 2017). The relative share of specific handball practice (training and matches) during this
428 period represented 58% of total training time, while physical training (strength and
429 endurance) represented 42% of this total time. This distribution changed as soon as the
430 competition period (PC1) began, with a relative share dedicated to physical training which
431 was reduced to 16% for T2-T3, 29% for T3-T4 and 9% for T4-T5 respectively (Figure 2.15).
432 This very significant reduction in the training time devoted to the development of physical
433 qualities can be explained by the major constraints (frequency of matches, recovery time,
434 numerous trips in France and abroad...) associated with the two phases of competition (PC1
435 and PC2 - Figure 2.14), which leave little room for sessions dedicated to the development of
436 physical qualities. This reduction was accentuated for T4-T5, during which the most
437 important competitions of the season were held and where the priority of the work was
438 focused on the technical and tactical aspects of handball. Only the T3-T4 period made it
439 possible to reintegrate a significant proportion of physical work (Pc2P2).

440 The general trend in our results shows that the effects of 47 weeks of training and competition
441 depending of periods of the year. Concerning body composition, which is a good indicator of
442 variations in athlete performance (Dubois et al., 2017), the average values of total body mass
443 and fat mass in our study are similar to those of Thorlund et al. (2008) et Chaouachi et al.
444 (2009). Our results show that total body mass does not change significantly over the entire
445 season. On the other hand, the percentage of fat mass is significantly lower ($p < 0.05$) at T2,
446 T3, T4 and T5 compared to T1. These results therefore indirectly indicate an increase in lean
447 mass during Pc2P. The decrease in body fat percentage during Pc2P can be explained by the
448 high values of this parameter at the beginning of this period. These high values are probably
449 related to the 5 weeks of vacation that preceded Pc2P. Ormsbee and Arciero (2012) show an

450 increase in body fat after 5 weeks of total physical inactivity in elite college swimmers. The
451 decrease in body fat percentage during Pc2P is also consistent with the literature. For
452 Gorostiaga et al (2006), the physical preparation period at the beginning of the season allows
453 the concomitant body composition values of the competition period to be found (Gorostiaga
454 et al., 2006). Moreover, Argus et al. (2010), in professional rugby players, show a $9.5 \pm 2.8\%$
455 decrease in body fat values between the beginning and end ($13.7 \pm 4.8\%$ vs $12.3 \pm 4.1\%$) of
456 the 4-week physical preparation period. The increase in lean mass during Pc2P is probably
457 related to an increase in muscle mass related to the significant training load proposed during
458 Pc2P. Gorostiaga et al. (2006) indeed showed, in elite level handball players, a significant
459 increase ($p < 0.01$) in muscle mass after a physical preparation period of 5 weeks. During this
460 period, the relative share of endurance work represented 31%, that of strength work was 29%
461 and specific handball work represented 38%.

462 Similar changes to anthropometric characteristics are observed in the field tests. Our results
463 show that MAV, SJ and CMJ are significantly ($p < 0.05$) higher at TT2, TT3, TT4 and TT5
464 compared to TT1 and that 5m SS is significantly ($p < 0.05$) lower at TT2, TT3, TT4 and TT5
465 compared to TT1. Our results corroborate those of Argus et al. (2010) which show, in
466 professional rugby players and after a 4-week physical preparation period at the beginning of
467 the season, an increase of $11.1 \pm 2.3\%$ and $11.3 \pm 4.7\%$ respectively in performance in
468 maximum strength tests performed on the upper and lower body. The work of Dubois et al
469 (2017) also shows an increase in drop jump values in professional rugby players after an 8-
470 week physical preparation period. As for anthropometric characteristics, the initial level of
471 physical qualities of our handball players at the beginning of Pc2P as well as the training
472 program proposed during Pc2P can explain our results. Indeed, the phenomenon of residual
473 effect of training is linked to the process of maladjustment that can occur when training
474 stimulation is insufficient (Mujika and Padilla, 2001). The increase in performance during
475 Pc2P could be related to the extra workload proposed during Pc2P. Coutts et al (2007) show
476 that a deliberate state of overload in professional rugby players increases their physical
477 abilities. On the methodological level, it's important to remember, concerning the results of
478 the field tests, that if TT1 corresponds well to T1, i.e. at the beginning of Pc2P, TT2 does not
479 correspond to T2 (end of Pc2P). TT2 is indeed located 5 weeks after T2, which means that the
480 effects of Pc2P on field test results are still observable 5 weeks after the end of Pc2P. These
481 results are in agreement with the works of Matveev (1981) and those of Issurin (2008) which
482 show that there exists, following the stop of a training, a persistence, during a certain time, of
483 the changes induced by this training. The absence of significant changes in field test results

484 during the competitive period (TT2, TT3, TT4 and TT5) could be explained by insufficient
485 training volume to allow appropriate development of players' physical performance
486 (Gorostiaga et al., 2006). Indeed, the relative share dedicated to specific handball training
487 represented 77.6% of total time during the competitive period. During the same period, the
488 strength training rate was 13.6% and the endurance training rate was 8.8%. These results are
489 similar to those of Dubois et al (2017) who show, in professional rugby players evolving in
490 the Top 14, a training time specific to rugby during the competitive period of approximately
491 80% of the total training time. These authors also show a training time devoted to strength
492 training equivalent to 15% of total training time and a training time devoted to fitness
493 equivalent to 5% of total training time. Our results are also similar to those of Gorostiaga et al
494 (2006). In this study, conducted among professional handball players, the sporting season was
495 divided into three distinct periods: a physical preparation phase (T1-T2) and two competition
496 phases (T2-T3 and T3-T4). The results of this study show that the time spent training
497 endurance qualities was equivalent to 31% of the total training time between T1 and T2, 25%
498 between T2 and T3 and finally 25% between T3 and T4. These authors also show that the
499 time spent on strength training was equivalent respectively to 29%, 10% and 17% of the total
500 training time over the same periods as those previously mentioned. Finally, the results of this
501 study show that the share of training and handball matches corresponded to 38% of the total
502 training time between T1 and T2, 63.4% between T2 and T3 and 58.5% between T3 and T4.
503 The physical qualities of the players in our study could probably be improved by appropriate
504 training during the competition period. However, during a sporting season, an elite handball
505 team plays at regular intervals with an average of 2 matches per week for a total of around 60
506 official matches which are divided between the national championship, the national cups, the
507 European league and the champions trophy. In addition to these games, players participate in
508 180 training sessions focused on technical and tactical work. This specific framework for
509 high-level handball therefore limits the time devoted to the development of physical abilities
510 (Holm et al., 2004; Schneider et al., 1988; Silva et al., 2013). In our study, the relative
511 proportion of training time dedicated to the development of physical qualities therefore does
512 not increase field test results but allows them to be maintained at their initial level (post
513 Pc2P). This maintenance of physical qualities during the competition season can be
514 explained, in part, by the variety and repetition of the numerous physical and physiological
515 demands during specific handball training. Indeed, at a high level of competition, a lot of
516 accelerations, decelerations, long races, passes and shots (shots in suspension, shots in
517 support with and without momentum) are carried out during technical-tactical training

518 sessions or matches (Michalsik et al., 2015a; Povoas et al., 2014). These actions, essential to
519 handball performance, (Karcher and Buchheit, 2014) require the qualities of relaxation
520 (Pereira et al., 2018), speed (Hermassi et al., 2017) and endurance (Michalsik et al., 2012)
521 respectively.

522 Concerning biological parameters, our results show a significantly lower hematocrit rate ($p <$
523 0.05) in T4 compared to T1, T3 and T5 and significantly lower average ferritin values ($p <$
524 0.05) in T5 compared to T1, T3 and T4 and (ii) in T4 compared to T1. These results are in
525 agreement with Brun et al (2003) who show that intensive training leads to an increase in
526 plasma volume and a decrease in H. In our study, the period between T3-T4 corresponds to a
527 relatively low training volume compared to other periods of the season. On the other hand,
528 this period includes Pc2P2, with a more intense physical work share compared to T2-T3 and
529 T4-T5. Our results also show mean values of [C]sg which are significantly ($p < 0.05$) lower in
530 T5 compared to T1, T3 and T4 and values of [T]sg significantly ($p < 0.05$) higher in T5
531 compared to T1, T3, T4 and significantly ($p < 0.05$) lower in T3 compared to T1 and T4. The
532 general trend of our results thus seems to indicate a decrease of [C]sg as the sporting season
533 progresses, with at the same time (with the exception of T3) an increase of [T]sg. Regarding
534 [C]sg our results do not corroborate those of Schelling et al (2015) which show, in
535 professional basketball players playing more than 25 minutes per game, that the competition
536 period of the months of March and April is concomitant with a significant increase ($p < 0.01$)
537 in the values of [C]sg. The significantly lower values of [C]sg observed at the end of the
538 season (T5) seem to attest to a beneficial effect of the programming and recovery strategy
539 proposed during the T4-T5 period, whose main objective was to reduce the number of intense
540 training sessions in order to spare organisms. Hooper et al. (1999) indeed show, in 7 high
541 level swimmers, a decrease in [C]sg values indicating an acute response to a decrease in
542 training load, or even a decrease in fatigue. The average values from [T]sg to T5 do not
543 corroborate those of Filaire et al. (2001) which show an increase of [C]sg and a decrease of
544 [T]sg during the 3rd and 4th periods of a professional football season. However, these authors
545 point out that this decrease in [T]sg followed a period of high intensity training. In our study,
546 the T4-T5 period corresponds to the total volume of concurrent significant training with a
547 rather low training intensity, which could explain our [T]sg values. Our results for IGF-1
548 show significantly ($p < 0.05$) lower average values of IGF-1 (i) in T5 compared to T1, T3, T4
549 and (ii) in T4 and T3 compared to T1. The average values of IGF-1 therefore seem to
550 gradually decrease as the sporting season progresses, while at the same time the average
551 values of IGFBP-3 do not vary significantly. The average end-of-season IGF-1 values are in

552 agreement with the work of Eliakim et al. (2002) which shows, among Israeli elite junior
553 handball players, a decrease in IGF-1 values after an intensive training period of 2 weeks.
554 They are also in agreement with the results of Brun et al. (1996) which show a significant
555 decrease ($p < 0.01$) of 24% of IGF-1 after 24 weeks of intense training in adolescent gymnasts
556 at the national level. Concerning IGFBP-3 our results show no significant change in this
557 parameter, which seems to attest to a relative state of freshness of our players throughout the
558 season. For Elloumi et al (2005) a decrease in IGFBP-3 values may indeed indicate an
559 excessive state of fatigue. Concerning [CK]sg, our results show no significant changes in the
560 mean values of this parameter during the season. Our results are however in agreement with
561 those of Bresciani et al. (2010) who, in national level handball players, show no significant
562 change in the average values of [CK]sg throughout a sporting season. The same is true for the
563 results of the study by Dubois et al. (2017) conducted on professional rugby players. These
564 two studies are very close to our study model (team sports and whole season). So they seem
565 to validate our results. The results of our work also show that the values of [F]sg are
566 significantly lower at the end of the season (in T4 and T5). This decrease in the values of
567 [F]sg is in contradiction with the values found in the work of Banfi et al. (2006), who
568 observed an increase in the values of [F]sg among elite rugby players in connection with the
569 increase in physical demand at the end of the season. On the other hand, most studies observe
570 a depletion of [F]sg stores in physical exercise (Roberts et Smith, 1990). This observation is
571 related to our values found at the end of the season and reinforces the idea of the dosage of
572 [F]sg as one of the markers of muscle inflammation in the longitudinal follow-up of athletes
573 (Dzedzej et al., 2016).

574 As we have just seen, the analysis of biological markers appears relevant in the context of
575 monitoring the fitness status of top athletes. On the other hand, this approach should be
576 coupled with perceptual markers, capable of providing very useful information. During this
577 study, we subjected the players to subjective questionnaires of state of form. The results of the
578 Hooper questionnaire (Table of values) show that the mean values of fatigue, sleep and stress
579 scores are significantly ($p < 0.05$) higher (i) at T4 compared to T1, T2, T3, T5 and (ii) at T3
580 and T5 compared to T1. Our results also show that the stress score is significantly ($p < 0.05$)
581 higher (i) at T2 and T5 compared to T1 and (ii) at T3 compared to T2 and T5. The general
582 trend of this score is therefore to increase from T1 to T4 and then decrease between T4 and
583 T5. Fatigue and sleep scores are significantly higher ($p < 0.05$) at T2 compared to T1, T3 and
584 T5. All mean pain score values are significantly different, with a score that increases
585 significantly from T1 to T4 and decreases significantly between T4 and T5. Finally, for each

586 of the scores, the highest average values are observed at T4. This last result does not seem to
587 be explained by the amount of training since the lowest average value per week of specific
588 handball training time is observed between T3 and T4. However, this period is also the one
589 where the number of weeks with two games per week ($n = 7$) is the most important. This
590 parameter could therefore explain the higher average values of the different scores at T4. Our
591 results corroborate those of Clemente et al (2017) who, based on a Hooper questionnaire,
592 show that playing two games a week instead of one increases fatigue, muscle pain and stress
593 scores among Portuguese professional footballers. These results are related to significantly
594 higher DOMS and fatigue values ($p < 0.001$) during the period at 2 games per week.
595 However, the results of the figure (that of the hooper) relativize those of the table (recap of
596 the hooper). They show that it is probably more interesting, on a seasonal basis, to use the
597 Hooper questionnaire once a week. This increase in the frequency of the questionnaire
598 administration allows a greater precision in the monitoring of the players' fitness state and
599 therefore in the management of the training load. Our results show that the peak values of the
600 different Hopper scores between T1 and T2 and between T2 and T3 are not observed at T2
601 and T3 but between T1 and T2 (week 4) and between T2 and T3 (weeks 12, 13 and 14). They
602 also show, once again, that the highest scores (weeks 3, 4 and 5) observed between T1 and T2
603 correspond to weeks with two matches per week. More generally, our results confirm the
604 work of Zurutuza et al (2017) who, among Spanish semi-professional football players who
605 were doing 3 to 4 training sessions and 1 match per week, underline the importance of
606 monitoring the level of fatigue of the players by means of subjective scale questionnaires in
607 order to propose an appropriate training load. For these authors the use of a rotation strategy
608 of players, would avoid an accumulation of fatigue that could prove harmful at the end of the
609 season. The analysis of injuries (figure of injuries) on the scale of the season allows us to
610 draw at least two lessons. The first is that the relative number of injuries is not very large. It
611 represents a maximum of 4 players injured at the same time out of a total of 19 players. The
612 second is that there appear to be two peaks in the number of injured players, corresponding to
613 T3 and T4 respectively. As we have seen previously, for each of the scores obtained in the
614 Hooper questionnaire, the highest average values are observed at T4. This result probably
615 reflects a fairly high level of player fatigue during this period, which could explain an
616 increase in the number of T4 injuries. However, at T3 the scores obtained on the Hooper
617 questionnaire are significantly lower than at T4. However, the figure (Hooper's) shows that
618 very high scores are observed between T1 and T2 and between T3 and T4. The peak in the

619 number of players injured in T3 would indicate a cumulative effect of the training load
620 between T1 and T3.

621 We also conducted VFC tests on all players. The analysis of the results of the average values
622 shows above all a trend which emerges in the period Q3-T4. Indeed, the values observed in
623 the supine position show an HR that goes from 53.3 ± 1.7 to 54.6 ± 1.9 , HF values that go
624 from 2512.8 ± 299.6 to 1871.8 ± 404.3 and RMSSD values that go from 78.5 ± 11.3 to $68.2 \pm$
625 11.2 . This decrease in mean values indicates a slight decrease in parasympathetic activity
626 while lying down, suggesting the onset of fatigue. Indeed, the work of Schmitt et al (2015)
627 shows that there may be a typology of fatigue based on several models initially defined in
628 elite Nordic skiers. This finding is in line with some of our other results, which show a
629 deterioration in Hooper and IGF-1 questionnaire values in relation to a low volume of work
630 and a high intensity in the period including Pc2P2. However, the analysis of the group's
631 average values does not allow us to go any further in the conclusions. The VFC test can
632 provide very useful information about how the ANS works. For that, an isolated test is not
633 enough and the comparison of several tests proves necessary in the interpretation of the
634 results and the recommendations of readjustment if necessary. Moreover, the test must first of
635 all be analysed individually to identify fatigue typologies specific to each player (Schmitt et
636 al., 2015).

637

638

Limitations

639 This study is not without limitations. Firstly, was that it was not possible to establish a control
640 group. The constraints inherent to a team at this level of competition (2 games per week) and
641 the international calendar prevented us from doing so. Secondly, a larger sample size (other
642 teams) is needed to confirm our results. Thirdly, this analysis of a single team's performance
643 might not be transposable for all the teams due to high inter-player variability linked to
644 different playing styles and training regimens. Finally, the data provided in this study concern
645 the first national level, not necessarily valid for the lower divisions of play.

646

647

4. PRATICAL APPLICATIONS

648

649 The high volume of handball training throughout the season limits the training time directed
650 to the development of physical qualities, in particular the quality of strength and endurance. In
651 order to better protect players and cope with the physical demand induced by a high level
652 match, the physical trainer should regularly integrate strength and power training sessions

653 during the competition periods to try to reduce injuries.
654 A combination of training and competition can lead to fatigue. This fatigue, detected from
655 different markers, can lead to a decrease in performance and/or an increase in injuries. In
656 order to remain competitive, it would be relevant for the physical trainer to individualize
657 training plans as much as possible. Overworked or under-trained states (Gabbett et al., 2016)
658 are not conducive to performance.

659

660

5. CONCLUSION

661

662 The end of season values observed in our study therefore seem to indicate that the regular
663 practice of handball at high level leads to a drift non functional of several markers. During a
664 sports season for a high level handball team, playing at a regular rate of 2 games per week,
665 needs to take care of accumulated fatigue. Although there are relationships between
666 physiological, psychological markers and time spent training, the relevance of biological
667 specimens is unclear and further studies should be conducted. Consequently, the results of our
668 study support the interest of choosing a pool of markers in several fields (physical,
669 psychological parameters, field tests and heart rate variability) in order not to overlook a state
670 of form that would deteriorate as the season progresses.

671

672

Acknowledgements

673

674 The authors would like to thank the professional handball players for their participation in this
675 research. This study did not receive any financial support. The authors have no professional
676 relationships with any companies or manufacturers identified in this study. The authors have
677 no conflict of interests that are directly relevant to the content of this study.

678

679

References

680

681 Banfi G, Del Fabro M, Mauris M, Corsi MM, Melegati G. Haematological parameters in elite
682 rugby players during a competitive season. *Clin Lab Haematol.* 2006;28(3):183-188.

683

684 Banister EW, Hamilton CL. Variations in iron status with fatigue modelled from training in
685 female distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1985;54(1):16-23.

686

687 Borresen J and Lambert MI. Quantifying training load: a comparison of subjective and
688 objective methods. *Int J Sports Physiol Perform.* 2008;3(1):16-30.

689

690 Bresciani G, Cuevas MJ, Garatachea N, Molinero O, Almar M, De Paz JA, Marquez S,
691 Gonzalez-Gallego J. Monitoring biological and psychological measures throughout an entire
692 season in male handball players. *Eur J Sport Sci.* 2010;6:377-384.
693
694 Budgett R. Fatigue and underperformance in athletes: the overtraining syndrome. *Br J Sports*
695 *Med*, 1998;32: 107-110.
696
697 Burgess DJ. The research doesn't always apply: practical solutions to evidence-based training
698 load monitoring in elite team sports. *Int J of Sports Physiol Perform*, 2017 ; 12: 136-141.
699
700 Bosco C, Komi PV. Potentiation of the mechanical behaviour of the human skeletal muscle
701 through prestretching. *Acta Physio Scand.* 1979;106:467-472.
702
703 Charlot K, Zongo P, Leicht AS, Hue O and Galy O. Intensity, recovery kinetics and well-
704 being indices are not altered during an official FIFA futsal tournament in Oceanian players. *J*
705 *Sports Sci*, 2015 : 34(4) : 379-88.
706
707 Clarke N, Farthing JP, Norris SR, Arnold BE, Lanovaz JL. Quantification of training load in
708 Canadian football : application of session-RPE in collision-based team sports. *J Strength*
709 *Cond Res.* 2013;27(8):2198-205.
710
711 Clemente FM, Mendes B, Nikolaidis PT, Calvete F, Carriço S and Owen AL. Internal training
712 load and its longitudinal relationship with seasonal player wellness in elite professional
713 soccer. *Physiology and Behavior*, 2017 ; 179: 262-267.
714
715 Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioural sciences.* 2nd ed. Hillsdale, NJ:
716 Lawrence Erlbaum; 1988.
717
718 Crewther B, Lowe T, Weatherby R, Gill N, Keogh J. Neuromuscular performance of elite
719 rugby union players and relationships with salivary hormones». *J Strength Cond Res.*
720 2009;23(7):2046-2053.
721
722 Durnin J, Rahaman M. The assessment of the amount of fat in the human body from
723 measurements of skinfold thickness. *Brit J Nutr.* 1967;21:681-689.
724
725 Dubois R, Paillard T, McGrath D and al. Changes in training load, running performance,
726 lower body power and biochemical characteristics of back players throughout a professional
727 Rugby Union season. *Journal of Human Sport and Exercise.* 2017;12.
728
729 Elloumi M, El E, Zaouali M, Maso F, Filaire E, Tabka Z, Lac G. Igfbp-3, a sensitive marker
730 of physical training and overtraining. *Br J Sports Med.* 2005;39(9):604-610.
731
732 Elloumi M, Ben O, Tabka Z, Van P, Michaux O, Lac G. Psychoendocrine and physical
733 performance responses in male tunisian rugby players during an international competitive
734 season. *Aggress Behav.* 2008;34(6):623-632.
735
736 Filaire E, Bernain X, Sagnol M and Lac G. Preliminary results on mood state, salivary
737 testosterone:cortisol ratio and team performance in a professional soccer team. *Eur J Appl*
738 *Physiol*, 2001 ; 86: 179-184.
739

740 Fry RW, Morton AR, Keast D. Overtraining in athletes. An update. *Sports Med.*
741 1991;12(1):32-65.
742

743 Gabbett TJ. The training-injury prevention paradox: should athletes be training smarter and
744 harder? *Br J Sports Med.* 2016;50:273-280.
745

746 Gaviglio C, Crewther B, Kilduff L, Stokes K, Cook C. Relationship between pregame
747 concentrations of free testosterone and outcome in rugby union». *Int J Sports Physiol*
748 *Perform.* 2014;9(2):324-331.
749

750 Gonzalez-Boto R, Salguero A, Tuero C, Marquez S. Spanish adaptation and analysis by
751 structural equation modeling of an instrument for monitoring overtraining: the recovery-stress
752 questionnaire (RESTQ-SPORT). *Social Behavior and Personality.* 2008;36(5):635-650.
753

754 Gorostiaga EM, Granados C, Ibañez J, González-Badillo JJ, Izquierdo M. Effects of an entire
755 season on physical fitness changes in elite male handball players. *Med Sci Sports Exe.*
756 2006;38(2):357-366.
757

758 Halson SL. Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Med.*
759 2014;44(2):139-147.
760

761 Hooper SL, Mackinnon LT. Monitoring overtraining in athletes. Recommendations. *Sports*
762 *Med.* 1995;20(5):321-327.
763

764 Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J. Progressive statistics for studies in
765 sports medicine and exercise science. *Med Sci Sport Exer.* 2009;41(1):3-13.
766

767 Leger L, Mercier D, Gadoury C and Lambert J. The multistage 20-meter shuttle run test for
768 aerobic fitness. *J Sports Sci.* 1988;6(2):93-101.
769

770 Le Meur Y, Pichon A, Schaal K, Schmitt L, Louis J, Gueneron J, Vidal PP, Hausswirth C.
771 Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes. *Med Sci*
772 *Sports Exerc.* 2013;45(11):2061-71.
773

774 Malone JJ, Di Michele R, Morgans R, Burgess D, Morton JP, Drust B. Seasonal training load
775 quantification in elite English premier league soccer players. *Int J Sports Physiol Perf.*
776 2015;10:489-497.
777

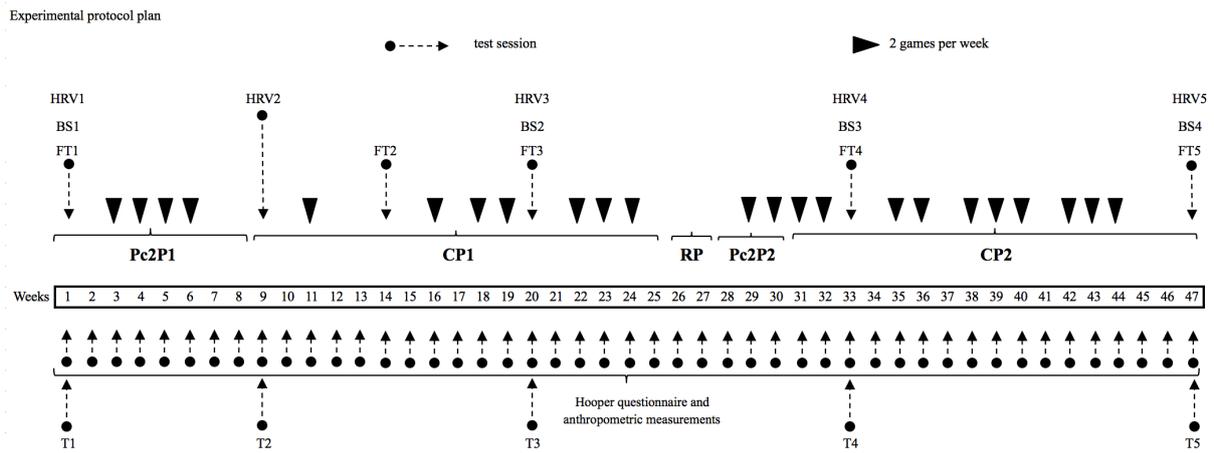
778 Michalsik LB, Aagaard P and Madsen K. Locomotion characteristics and match induced
779 impairments in physical performance in male elite team handball players. *Int J Sports Med*
780 2013 ; 34(7): 590-599.
781

782 Michalsik LB, Madsen K, Aagaard P. Physiological capacity and physical testing in male
783 elite team handball. *J Sports Med Phys Fitness.* 2015;55:415-429.
784

785 Nunes JA, Moreira A, Crewther BT, Nosaka K, Viveiros L, Aoki MS. Monitoring training
786 load, recovery-stress state, immune-endocrine responses, and physical performance in elite
787 female basketball players during a periodized training program. *J Strength Cond Res.*
788 2014;28:2973-2980.
789

790 Pomerantz B, Macaulay RJ, Caudil MA, Kutz I, Adam D, Gordon D, Kilborn KM, Barger
791 AC, Shannon DC, Cohen RJ. Assessment of autonomic function in humans by heart rate
792 spectral analysis. *Am J Physiol*. 1985;248:151-53.
793
794 Povoas SCA, Ascensao AAMR, Magalhaes J, Seabra AFT, Krstrup P, Soares JMC, Rebello
795 ANC. Physiological demands of elite team handball with special reference to playing
796 position. *J Strength Cond Res*. 2014;28(2):430-42.
797
798 Sanchis-Gomar F, Alis R, Rampinini E, Bosio A, Ferioli D, La Torre A, Xu J, Sansoni V,
799 Perego S, Romagnoli M, Lombardi G. Adropin and apelin fluctuations throughout a season in
800 professional soccer players : are they related with performance. *Peptides*. 2015;70:32-6.
801
802 Schmitt L, Regnard J, Desmarests M, Mauny F, Mourot L, Fouillot JP, Coulmy N, Millet G.
803 Fatigue shifts and scatters heart rate variability in elite endurance athletes. *PLoS One*.
804 2013;12(8):e71588.
805
806 Schmitt L, Regnard J, Millet GP. Monitoring Fatigue Status with HRV Measures in Elite
807 Athletes: An Avenue Beyond RMSSD? *Front Physiol*. 2015;19(6):343.
808
809 Schmitt L, Regnard J, Parmentier AL, Mauny F, Mourot L, Coulmy N, Millet GP. Typology
810 of fatigue by heart rate variability analysis in elite nordic-skiers. *Int J Sports Med*.
811 2015;36(12):999-1007.
812
813 Schmitt L, Regnard J, Auguin D, Millet G. Monitoring training and fatigue with heart rate
814 variability: case study in a swimming olympic champion. *Journal of Fitness Research*.
815 2016;5(3):38-45.
816
817 Sibila M, Vuleta D, Pori P. Position-related differences in volume and intensity of large-scale
818 cyclic movements of male players in handball. *Kinesiology*. 2004;1:55-68.
819
820 Task-Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing
821 and Electrophysiology. Heart rate variability: standards of measurement, physiological
822 interpretation and clinical use. 1996;Circulation 93:1043-65.
823
824 Young W, MacDonald CH, Heggen T, Fritzpatrick J. An evaluation of the specificity, validity
825 and reliability of jumping tests. *J Sports Med Phys Fitness*. 1997;37:240-245.
826
827 Zurutuza U, Castellano J, Echeazarra I and Casamichana D. Absolute and relative training
828 load and its relation to fatigue in football. *Front Psychol*, 2017 ; 8: 878.
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838

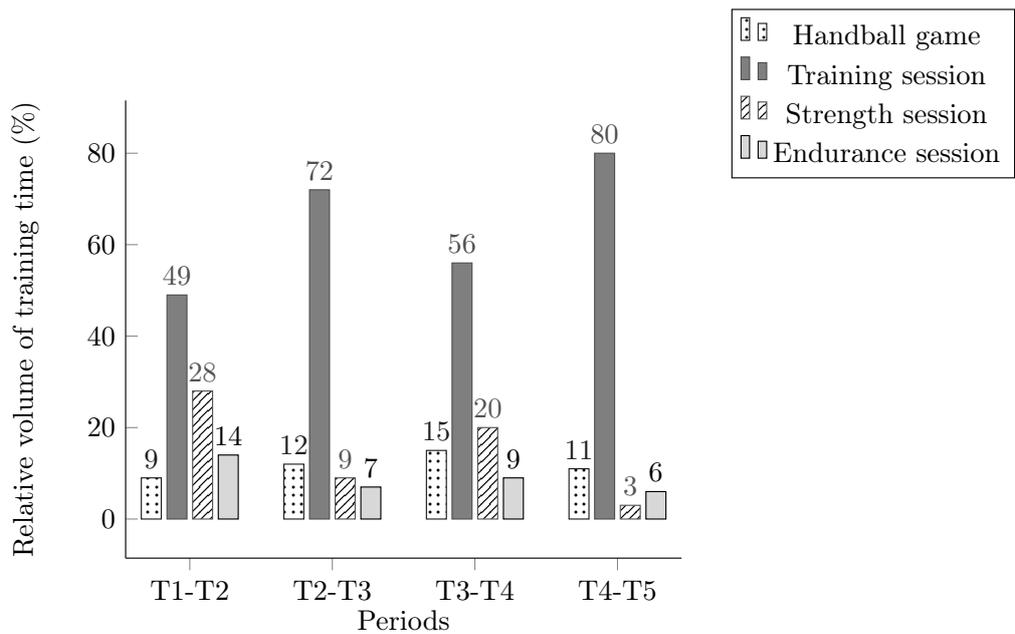
839 *Figure 1: Overview of sports season experimental protocol.*



840
 841 *Pc2P1: Pre-competitive preparation period 1; Pc2P2: Pre-competitive preparation period 2; CP1: Competitive*
 842 *period 1; CP2: Competitive period 2; RP: Rest period; FT1-FT5: Field tests sessions; BS1-BS4: Blood samples*
 843 *sessions; HRV1-HRV5: Heart rate variability tests sessions; T1-T5: Testing session 1-5 for statistical analysis.*

844
 845
 846
 847
 848
 849
 850
 851
 852
 853
 854
 855
 856
 857
 858
 859
 860
 861
 862
 863
 864
 865

866 *Figure 2 : Evolution of the relative volume of training over the season.*



867

868 *T1-T5 : Testing session 1-5 for statistical analysis.*

869

870

871

872

873

874

875

876

877

878

879

880

881

882

883

884

885

886

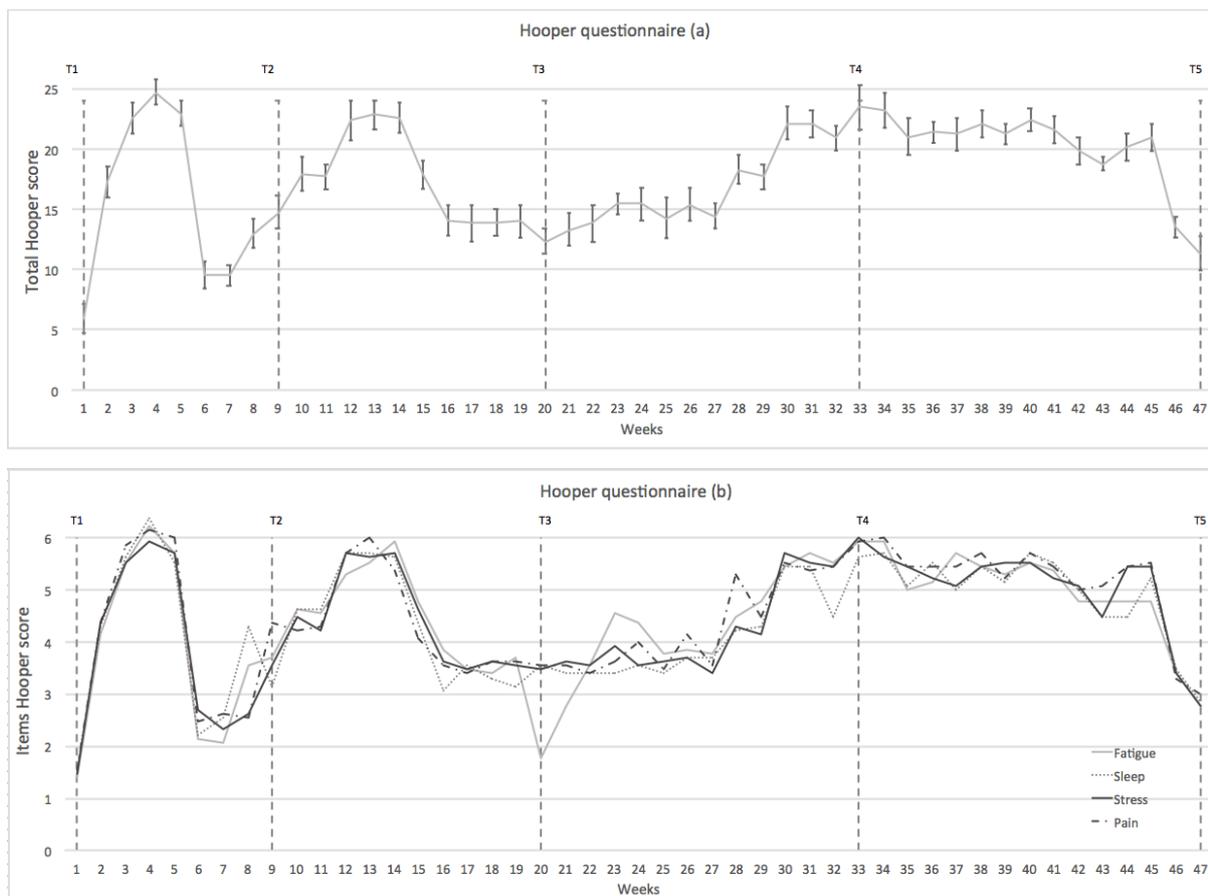
887

888

889

890 *Figure 3: Evolution of the Hooper scores over the season.*

891



892

893 *3a : Evolution of the total Hooper score ; 3b : Evolution of the four items Hooper score. T1-T5 : Testing session*

894 *1-5 for statistical analysis.*

895

896

897

898

899

900

901

902

903

904

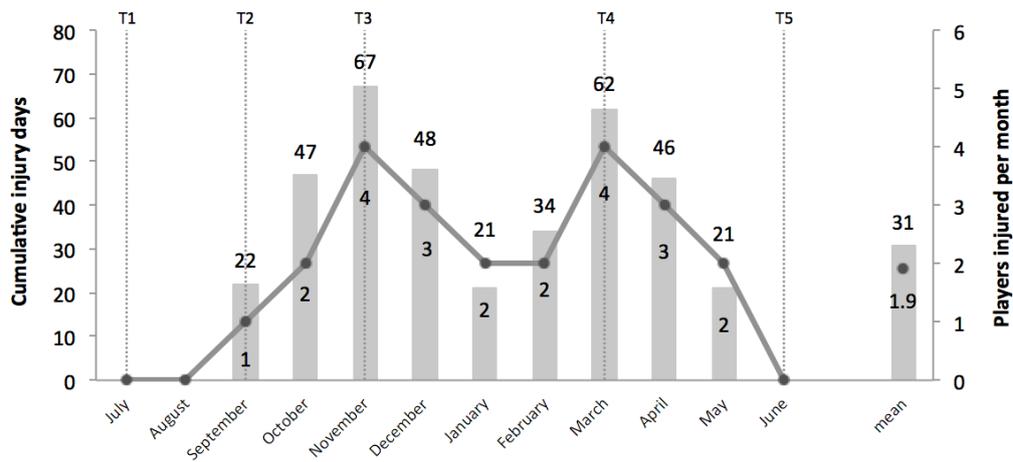
905

906

907

908

909 *Figure 4 : Evolution of the cumulative days injury on lower and upper limb and injured*
 910 *players number over the season.*



911
 912 *T1-T5 : Testing session 1-5 for statistical analysis.*

913
 914
 915
 916
 917
 918
 919
 920
 921
 922
 923
 924
 925
 926
 927
 928
 929
 930
 931
 932
 933
 934
 935

936 Table 1: Annual organization of endurance and strength sessions.

Annual physical training program															
Tests sessions	T1			T2			T3			T4			T5		
Weeks	1 - 2	3 to 6	7 - 8	9 - 10	11 to 16	17 - 18	19 to 22	23 to 25	28 - 29	30 - 31	32 to 35	36 to 38	39 - 40	41 to 44	45 to 47
Training Endurance	AC Fartlek 30-50min 65 - 80 % VMA	MAP 180-15sec 100% MAV r= 180-15 sec 2x 6-10 reps R= 3-5 min	MAP-AP 30-5 sec 110% MAV r = 15 sec 2 x 5-6 reps R= 4 min	RSA 5 sec sprint r = 15 sec 2 x 6 reps R= 8 min	MAP 15 sec 110% MAV r = 15 sec 3 x 14 reps R= 4 min	AP 30 sec sprint r = 4 min 2 x 5 reps R= 5 min	RSA 5 sec sprint r = 15 sec 2 x 6 reps R= 8 min	RSA 5 sec sprint r = 15 sec 2 x 6 reps R= 8 min	AC 45 min 65 - 75 % VMA	MAP 15 sec 110% MAV r = 15 sec 3 x 14 reps R= 4 min	PAP 30 sec sprint r = 4 min 2 x 5 reps R= 5 min	RSA 5 sec sprint r = 15 sec 2 x 6 reps R= 8 min	MAP 15 sec 110% VMA r = 15 sec 3 x 14 reps R= 4 min	PA 30 sec sprint r = 4 min 2 x 5 reps R= 5 min	RSA 5 sec sprint r = 15 sec 2 x 6 reps R= 8 min
Training Strength	Strength endurance 4x 12-20 reps 40 to 60% 1-RM R= 1 min30 Squat Deadlift Rowing Bench Press Military P	Maximum Strength 3x 4-8 reps 70 to 90% 1-RM R= 3-4 min Squat Step-up Rowing Bench Press	Power 3x 6-7 reps 50 to 60% 1-RM R= 2 min30 Squat Step-up Snatch Pull-Over	Explosivity 3x 6 reps 30% 1-RM R= 3 min Squat Deadlift Step-Up Bench Press	Power 3x 6-7 reps 50 to 60% 1-RM R= 2 min30 Squat Step-up Pull-Over Snatch	Maximum Strength 3x 4 reps 90% 1-RM R= 3-4 min Squat Deadlift Bench Press	Power 3x 6 reps 50% 1-RM R= 2 min30 Squat Step-up Snatch Pull-Over	Explosivity 3x 6 reps 30% 1-RM R= 3 min Squat Deadlift Step-Up Pull-Over	Hypertrophy 12x 10 reps 70% 1-RM R= 2 min Squat Press Rowing Military P	Maximum Strength 3x 4 reps 90% 1-RM R= 4 min Squat Deadlift Bench Press Clean	Power 3x 6 reps 50% 1-RM R= 3 min Squat Step-up Snatch Pull-Over	Explosivity 3x 6 reps 30% 1-RM R= 3 min Squat Deadlift Step-Up Bench Press	Maximum Strength 3x 4 reps 90% 1-RM R= 4 min Squat Deadlift Push-Press Rowing	Power 3x 6 reps 50% 1-RM R= 3 min Squat Step-up Snatch Clean	Explosivity 3x 6 reps 30% 1-RM R= 3 min Squat Deadlift Step-Up Pull-Over

938 *AC: aerobic capacity ; MAP: maximal aerobic power ; AP: aerobic power ; RSA: repeated sprint ability; AP:*
939 *anaerobic power; MAV: maximal aerobic velocity; R: recovery inter series ; r : recovery inter repetitions.*

940
941

942 *Table 2 : Mean values (\pm SEM) of anthropometric characteristics over the season.*

	T1	T2	T3	T4	T5
Body Mass (kg)	96.08 \pm 3.65	95.59 \pm 3.45	96.25 \pm 3.42	95.71 \pm 3.07	95.70 \pm 3.08
Fat mass (%)	12.20 \pm 0.72 ^(2,3,4,5)	11.01 \pm 0.74	10.43 \pm 0.60	10.68 \pm 0.60	10.35 \pm 0.59

2 : Significantly different from T2

3 : Significantly different from T3

4 : Significantly different from T4

5 : Significantly different from T5

p<0.05

943

944 *T1-T5 : Testing session 1-5 for statistical analysis.*

945

946

947

948

949

950

951

952

953

954

955

956

957

958

959

960

961

962

963

964

965

966

967

968

969

970

971 *Table 3: Mean values (\pm SEM) of characteristics of training over the season.*

	T1-T2	T2-T3	T3-T4	T4-T5
Duration (weeks)	8	11	13	15
Number of handball training sessions	46	48	55	77
Mean handball training sessions per week	5.8	4.4	4.2	5.1
Mean handball time (min)	1741.3 \pm 131.8	2771.9 \pm 172.1	1922.0 \pm 236.5	4301.7 \pm 108.4
Mean handball time per week (min)	217.7	252.0	147.8	286.8
Mean strength training time (min)	844.2 \pm 39.0	300 \pm 0	600 \pm 0	150 \pm 0
Mean Endurance training time (min)	420 \pm 0	240 \pm 0	280 \pm 0	290 \pm 0
Number of physical training session	34	17	25	18
Number of matches	8	19	20	21

972
973 *T1-T5 : Testing session 1-5 for statistical analysis*

974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
1001

1002 *Table 4: Mean values (\pm SEM) for physical parameters over the season.*

	FT1	FT2	FT3	FT4	FT5
MAV (km.h ⁻¹)	13.70 \pm 0.10	13.87 \pm 0.11 ⁽¹⁾	13.88 \pm 0.11 ⁽¹⁾	14.02 \pm 0.11 ⁽¹⁾	13.91 \pm 0.14 ⁽¹⁾
SJ (cm)	37.60 \pm 1.47	38.79 \pm 1.47 ⁽¹⁾	39.00 \pm 1.48 ⁽¹⁾	39.48 \pm 1.60 ⁽¹⁾	39.92 \pm 1.57 ⁽¹⁾
CMJ (cm)	39.05 \pm 1.56	41.06 \pm 1.58 ⁽¹⁾	41.45 \pm 1.77 ⁽¹⁾	42.32 \pm 1.80 ⁽¹⁾	42.25 \pm 1.69 ⁽¹⁾
5m SS (s)	1.000 \pm 0.009	0.990 \pm 0.009 ⁽¹⁾	0.980 \pm 0.006 ⁽¹⁾	0.980 \pm 0.008 ⁽¹⁾	0.980 \pm 0.007 ⁽¹⁾

1 : Significantly different from T1
p<0.05

1003
1004 *MAV: maximum aerobic velocity ; SJ: squat jump ; CMJ: counter movement jump ; 5m SS: 5m sprint start-stop ;*
1005 *FT1-FT5: Field tests sessions.*

1006
1007
1008
1009
1010
1011
1012
1013
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1030
1031
1032
1033

1034 *Table 5: Mean values (\pm SEM) of biological parameters over the season.*

	T1	T3	T4	T5
Hematocrit (%)	46.72 \pm 2.05 ⁽⁴⁾	45.42 \pm 1.79 ⁽⁴⁾	44.79 \pm 1.76	45.98 \pm 1.92 ⁽⁴⁾
CPK (UI/L)	214.15 \pm 140.29	231.38 \pm 231.48	224.46 \pm 126.20	217.54 \pm 152.38
Ferritin (ng/mL)	107.31 \pm 51.98 ^(4,5)	108.85 \pm 55.36 ⁽⁵⁾	107.31 \pm 50.91 ⁽⁵⁾	96.69 \pm 40.31
Cortisol (nmol/L)	537.54 \pm 141.51 ⁽⁵⁾	526.54 \pm 97.09 ⁽⁵⁾	516.31 \pm 89.51 ⁽⁵⁾	482.39 \pm 106.96
IGFBP-3 (ng/mL)	2313.92 \pm 216.96	2618.69 \pm 303.29	2620.92 \pm 656.45	2801.92 \pm 1058.92
Testosterone (nmol/L)	20.97 \pm 3.60 ⁽³⁾	19.61 \pm 3.84	22.11 \pm 4.13 ⁽³⁾	24.86 \pm 4.87 ^(1,3,4)
IGF-1 (μ g)	217.68 \pm 32.00 ^(3,4,5)	201.38 \pm 36.68 ⁽⁵⁾	198.25 \pm 32.58 ⁽⁵⁾	189.54 \pm 33.43

1 : Significantly different from T1

2 : Significantly different from T2

3 : Significantly different from T3

4 : Significantly different from T4

p<0.05

1035

1036 *CPK : creatin kinase ; IGFBP-3 : insulin growth factor binding protein 3 ; IGF-1 : insulin growth factor 1. T1-*

1037 *T5 : Testing session 1-5 for statistical analysis.*

1038

1039

1040

1041

1042

1043

1044

1045

1046

1047

1048

1049

1050

1051

1052

1053

1054

1055

1056

1057

1058

1059

1060

1061

1062

1063 *Table 6: Mean values (\pm SEM) of psychological parameters over the season.*

	T1	T2	T3	T4	T5
Fatigue	1.38 \pm 0.14	3.54 \pm 0.14 ^(1,3,5)	2.77 \pm 0.12 ⁽¹⁾	5.92 \pm 0.21 ^(1,2,3,5)	2.76 \pm 0.17 ⁽¹⁾
Sleep	1.54 \pm 0.14	4.30 \pm 0.13 ^(1,3,5)	3.38 \pm 0.18 ⁽¹⁾	5.61 \pm 0.14 ^(1,2,3,5)	2.85 \pm 0.19 ⁽¹⁾
Stress	1.46 \pm 0.14	2.61 \pm 0.14 ⁽¹⁾	3.61 \pm 0.14 ^(1,2,5)	6.00 \pm 0.20 ^(1,2,3,5)	2.77 \pm 0.12 ⁽¹⁾
Pain	1.54 \pm 0.14*	2.54 \pm 0.14*	3.54 \pm 0.21*	5.92 \pm 0.21*	3.00 \pm 0.23*
Total	5.92 \pm 1.19	14.76 \pm 1.36	14.00 \pm 1.35	23.46 \pm 1.85	11.38 \pm 1.45

1 : Significantly different from T1

2 : Significantly different from T2

3 : Significantly different from T3

4 : Significantly different from T4

5 : Significantly different from T5

* : All is significantly different

p<0.05

1064

1065 *T1-T5 : Testing session 1-5 for statistical analysis.*

1066

1067

1068

1069

1070

1071

1072

1073

1074

1075

1076

1077

1078

1079

1080

1081

1082

1083

1084

1085

1086

1087

1088

1089

1090

1091 *Table 7: Mean values (\pm SEM) of heart rate variability parameters over the season.*

	T1	T2	T3	T4	T5
Supine					
HR (bpm)	57.56 \pm 1.70 ^(2,3,4)	53.15 \pm 1.73	53.26 \pm 1.71	54.57 \pm 1.93	57.11 \pm 1.52 ^(2,3,4)
RMSSD (ms)	66.67 \pm 10.81	73.05 \pm 11.82	78.52 \pm 11.27	68.16 \pm 11.18	52.41 \pm 6.88
LF (ms ²)	1466.08 \pm 333.39	1383.23 \pm 335.09	1471.77 \pm 236.47	1678.92 \pm 515.80	1539.00 \pm 199.77
HF (ms ²)	1470.85 \pm 395.10	1840.00 \pm 405.33	2512.77 \pm 299.63 ^(1,2,4,5)	1871.85 \pm 404.28	2002.00 \pm 341.84
LF+HF (ms ²)	2936.92 \pm 695.13	3223.23 \pm 567.36	3984.54 \pm 426.24 ^(1,2,4)	3550.77 \pm 831.77	3541.00 \pm 486.50 ^(1,2,4)
TP (ms ²)	6065.92 \pm 1907.27	5229.85 \pm 778.29	6341.46 \pm 674.71 ^(1,2,4,5)	5275.61 \pm 1135.19	5526.69 \pm 625.05
Standing					
HR (bpm)	83.73 \pm 3.48 ^(2,3,4,5)	76.41 \pm 3.08	74.18 \pm 2.53	79.98 \pm 4.74	77.09 \pm 2.94
RMSSD (ms)	22.46 \pm 5.28	29.01 \pm 4.35	32.97 \pm 4.99	33.72 \pm 5.20	27.84 \pm 3.75
LF (ms ²)	2272.00 \pm 1223.08	2224.15 \pm 436.97 ⁽¹⁾	2915.38 \pm 423.53 ^(1,2,4,5)	2234.54 \pm 489.86 ⁽¹⁾	2285.92 \pm 453.99 ⁽¹⁾
HF (ms ²)	314.31 \pm 169.43	334.85 \pm 80.87 ⁽¹⁾	434.00 \pm 65.23 ⁽¹⁾	417.07 \pm 108.24 ⁽¹⁾	314.77 \pm 54.99 ⁽¹⁾
LF+HF (ms ²)	2596.30 \pm 1391.68	2559.00 \pm 506.48 ⁽¹⁾	3349.38 \pm 482.46 ^(1,2,4,5)	2651.61 \pm 556.87 ⁽¹⁾	2600.69 \pm 461.35 ⁽¹⁾
TP (ms ²)	6004.08 \pm 3820.88	5068.00 \pm 1035.83 ⁽¹⁾	6277.85 \pm 1073.69 ^(1,2,4,5)	6469.92 \pm 1333.20 ⁽¹⁾	5069.08 \pm 971.84 ⁽¹⁾

1 : Significantly different from T1

2 : Significantly different from T2

3 : Significantly different from T3

4 : Significantly different from T4

5 : Significantly different from T5

p<0.05

1092

1093 *HR: heart rate ; LF: low frequencies; HF: high frequencies; TP: total power (very low fréquences+LF+HF);*

1094 *RMSSD: root mean square of the successive difference ; T1-T5 : Testing session 1-5 for statistical analysis.*

Résumé de thèse

Ce travail de thèse avait pour objectif d'analyser l'influence d'une saison sportive sur les caractéristiques physiques, physiologiques et psychologiques des joueurs de handball du club de Montpellier Agglomération Handball, un des meilleurs clubs européens. Dans un premier temps (Etude 1), nous nous sommes intéressés à l'évolution du profil musculaire isocinétique des membres inférieurs pendant la phase de préparation pré-compétitive (Pc2P). Bien que cette période soit courte (8 semaines), nos résultats montrent que la plupart des valeurs de force, de puissance (à $30^\circ \cdot s^{-1}$, $60^\circ \cdot s^{-1}$ et $240^\circ \cdot s^{-1}$, en concentrique et en excentrique), et des différents ratios (agoniste vs antagoniste, dominant vs non dominant ainsi que le ratio mixte) augmentent significativement pendant Pc2P. Dans un deuxième temps (Etude 2), nous nous sommes intéressés à l'évolution du profil musculaire isocinétique des membres inférieurs pendant la période de compétition. Nos résultats montrent qu'une saison de compétition n'impacte pas significativement l'évolution de la plupart des paramètres isocinétiques suscités. Enfin, au cours de notre 3^e travail, nous avons étudié l'évolution de certains marqueurs (biologiques, physiologiques et psychologiques) au cours d'une saison sportive. Les principaux résultats de nos travaux montrent (i) une baisse des valeurs moyennes de VFC concernant les valeurs de HF et de RMSSD, couplée à une légère augmentation de FC en T4, laissant supposer une baisse de l'activité parasympathique en position couchée, (ii) une augmentation des valeurs au questionnaire d'état de forme en T4 et (iii) une diminution des valeurs de $[C]_{sg}$, $[F]_{sg}$, IGF-1 et Hématocrite, respectivement en T5 et T4. Les résultats des valeurs de Testostérone montrent une augmentation significative en T5. Ils ne montrent aucune modification significative des valeurs de CPK et d'IGFBP-3. Ces travaux soulignent la nécessité de développer les qualités de force et de puissance le plus efficacement possible pendant Pc2P et de cibler les marqueurs les plus pertinents pour le suivi longitudinal des joueurs de handball.

Summary of thesis

The objective of this thesis was to analyze the influence of a sports season on the physical, physiological and psychological characteristics of handball players of the Montpellier Agglomération Handball club, one of the best European clubs. At first (Study 1), we were interested in the evolution of the isokinetic muscular profile of the lower limbs during the pre-competitive preparation phase (Pc2P). Although this period is short (8 weeks), our results show that most of the values of strength, power (at $30^\circ \cdot s^{-1}$, $60^\circ \cdot s^{-1}$ and $240^\circ \cdot s^{-1}$, in concentric and eccentric), and different ratios (agonist vs antagonist, dominant vs non-dominant as well as mixed ratio) increase significantly during Pc2P. In a second phase (Study 2), we were interested in the evolution of the isokinetic muscular profile of the lower limbs during the competition period. Our results show that a competitive season does not significantly affect the evolution of most of isokinetic parameters. Finally, during our 3rd work, we studied the evolution of many markers (biological, physiological and psychological) during a sports season. The main results of our work show (i) a decrease in the mean values of VFC concerning HF and RMSSD values, coupled with a slight increase in HR in T4, suggesting a decrease in parasympathetic activity in the supine position, (ii) an increase in the values in the T4 fitness questionnaire and (iii) a decrease in the values of $[C]_{sg}$, $[F]_{sg}$, IGF-1 and Hematocrit, respectively in T5 and T4. Testosterone results show a significant increase in T5. They showed no significant change in CPK and IGFBP-3 values. This work emphasizes the need to develop the strength and power qualities most effectively during Pc2P and to target the most relevant markers for longitudinal tracking of handball players.