HAL
open science

Evaluation de l'adaptation à l'entraînement du footballeur professionnel par la variabilité de la fréquence cardiaque : intérêt de la position debout

Guillaume Ravé

▶ **To cite this version:**

Guillaume Ravé. Evaluation de l'adaptation à l'entraînement du footballeur professionnel par la variabilité de la fréquence cardiaque : intérêt de la position debout. Médecine humaine et pathologie. Université d'Angers, 2016. Français. NNT : 2016ANGE0040 . tel-01652114

HAL Id: tel-01652114

https://theses.hal.science/tel-01652114v1

Submitted on 29 Nov 2017

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.

UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

université angers

Thèse de Doctorat

GUILLAUME RAVÉ

Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'Université d'Angers
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

École doctorale : *Biologie-Santé*

Discipline : *Physiologie, biologie des organismes, populations, interactions*
Spécialité: *Physiologie et physiopathologie humaine*
Unité de recherche : *Biologie Neurovasculaire et Mitochondriale intégrée*

Soutenue le 8 décembre 2016

Evaluation de l'adaptation à l'entraînement du footballeur professionnel par la variabilité de la fréquence cardiaque

Intérêt de la position debout

JURY

Rapporteurs :
François COTTIN. Professeur, Université Paris-Sud
Hassane ZOUHAL. Professeur, Université de Rennes.

Examinateurs :
Marc Antoine CUSTAUD. Professeur, Université d'Angers
Claude COUREAU, Médecin, CHU Nantes
Frédéric AUBERT, Responsable de la préparation physique. Fédération Française de Football

Directeur de Thèse :
Jacques-Olivier FORTRAT. Maître de conférence-Praticien hospitalier, HDR. Université d'Angers

2015-2016

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de Docteur de l'Université d'Angers

ÉVALUATION DE L'ADAPTATION À L'ENTRAÎNEMENT DU FOOTBALLEUR PROFESSIONNEL PAR LA VARIABILITÉ DE LA FRÉQUENCE CARDIAQUE : INTÉRÊT DE LA POSITION DEBOUT

RAVÉ GUILLAUME

Sous la direction de M.
Fortrat Jacques-Olivier

Membres du jury
Cottin François | Professeur des Universités
Zouhal Hassane | Professeur des Universités
Custaud Marc-Antoine | Professeur des Universités
Aubert Frédéric | Responsable de la préparation physique à la Fédération française de Football
Coureau Claude | Praticien attaché en centre hospitalier

Soutenu publiquement le :
08 décembre 2016

université angers

L'auteur du présent document vous autorise à le partager, reproduire, distribuer et communiquer selon les conditions suivantes :

- Vous devez le citer en l'attribuant de la manière indiquée par l'auteur (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'il approuve votre utilisation de l'œuvre).
- Vous n'avez pas le droit d'utiliser ce document à des fins commerciales.
- Vous n'avez pas le droit de le modifier, de le transformer ou de l'adapter.

Consulter la licence creative commons complète en français :
http://creativecommons.org/licences/by-nc-nd/2.0/fr/

Ces conditions d'utilisation (attribution, pas d'utilisation commerciale, pas de modification) sont symbolisées par les icônes positionnées en pied de page.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier le Docteur Claude Coureau, responsable médical du Stade Lavallois MFC (2007-2015). Claude, tu as toujours été à mes côtés au cours de ces dix années. Tu m'as d'abord initié puis guidé, puis encouragé et enfin soutenu. En plus du profond respect que j'ai à ton égard, je te suis extrêmement reconnaissant.

Merci aux présidents Philippe Jan et Christian Duraincie qui m'ont autorisé à poursuivre mon parcours universitaire au sein du Stade Lavallois MFC. Ainsi qu'aux entraîneurs Philippe Hinschberger et Denis Zanko qui m'ont fait confiance et m'ont laissé la possibilité de mettre en place mes protocoles de recherche. Puis à l'ensemble des joueurs qui se sont investis dans les différents protocoles expérimentaux que je leur ai proposés.

Merci à Laurent Schmitt, grand spécialiste de la variabilité de la fréquence cardiaque dans le sport de haut niveau. Laurent, tu m'as initié lors d'une formation à l'Insep. Ta rencontre a été essentielle dans mon parcours. Tu as toujours été disponible pour répondre à mes nombreuses questions.

Je tiens également à remercier les membres du jury : Pr François Cottin et Pr Marc-Antoine Custaud d'avoir acceptés d'évaluer mon travail en tant que rapporteur ; Pr Hassane Zouhal, Claude Coureau et Frédéric Aubert d'avoir accepté d'être membre de ce jury. Votre expertise dans vos champs respectifs m'honore de votre présence.

Un grand merci à tous ceux qui m'ont aidé pour ce travail, vos compétences respectives m'ont été très précieuses: Emmanuel Bidault, Fabien Garnier, François Plessis, Jérôme Ravé, Lilian Nalis, Samantha Tanguy, Sullivan Coppalle, Sylvain Durand.

Enfin, Jacques-Oliver, merci d'avoir accepté de me diriger pour ce travail de thèse. L'homme de science que tu es a été essentiel à la réalisation de ce travail. Je te remercie également pour ta patience, ton indulgence ainsi que ta disponibilité et ton soutien quotidien. Je mesure ma chance d'avoir pu travailler à tes côtés et j'y ai pris énormément de plaisir. Je te suis extrêmement reconnaissant et j'ai un profond respect pour les valeurs morales que tu incarnes.

A mes Parents, Camille et Juliette

Sommaire

INTRODUCTION.....1

METHODES.....13

ETUDE 1.....18

G. Ravé, J.O. Fortrat, B. Dawson & H. Zouhal. Heart rate recovery and heart rate variability: Use and relevance in European professional football. *En révision (Science and Medicine in Football)*

ETUDE 2.....43

G. Ravé, B. Beaune, C. Coureau & S. Durand. Use of heart rate variability analysis in the longitudinal follow up of professional soccer players. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2010; 13(S1): 117-119

ETUDE 3.....53

G. Ravé & J.O. Fortrat. Heart rate Variability in the standing position reflects training adaptation in professional soccer players. *European Journal of Applied Physiology.* 2016, 116(8): 1575-1582

ETUDE 4.....79

G. Ravé, H. Zouhal, W. Kebsi & J.O. Fortrat. The relationship between the perception of physical fitness and heart rate variability in professional soccer players. *Soumis (The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness)*

CONCLUSION.....98

PERSPECTIVES.....103

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE.....106

ANNEXES.....118

Introduction

Sport le plus populaire au monde avec plus de 264 millions de pratiquants, le football professionnel est aujourd'hui un enjeu à la fois social, politique et économique. Le football professionnel est le sport qui génère le plus d'argent. Les droits télévisuels, le marchandising, la vente de billets, la publicité, le sponsoring sont autant d'éléments qui vont impacter les principaux acteurs du football : les joueurs. Ainsi, les règles du football, par exemple, ont été modifiées dans le but de rendre le jeu plus spectaculaire donc plus attractifs. Ou encore, le calendrier des matchs, souvent choisi par les chaines de télévision peut réduire la récupération entre deux matchs et donc augmenter le risque de blessure des joueurs (Carling et coll., 2016). Enfin, certains clubs, pour des raisons financières peuvent réaliser des matchs amicaux à plusieurs heures d'avion et de décalage horaire provoquant une fatigue supplémentaire (Fowler et coll., 2015). Cette mutation du football au cours des 20 dernières années a augmenté la sollicitation des joueurs tant au cours d'un match qu'au cours d'une saison.

Analyse de l'activité football

Sollicitation au cours d'un match

Le football est un jeu d'opposition où, sur un terrain rectangulaire de 100 à 110 mètres de long sur 64 à 75 mètres de large, deux équipes composées de 11 joueurs chacune, s'opposent pendant deux mi-temps de quarante-cinq minutes chacune. Durant ces deux mi-temps, les joueurs réalisent une succession aléatoire de périodes de faible intensité autorisant une relative récupération avec des périodes d'efforts de durée et d'intensité variables (Stolen et coll., 2005). Les paramètres situationnels comme le lieu du match, le niveau de l'adversaire, le score, la tactique de l'équipe (Lago-Penas, 2012) ou encore le poste occupé (Di Salvo et coll., 2007) sont des éléments qui rendent l'activité physique d'un joueur aléatoire et donc ni standardisée et ni standardisable. Néanmoins, les systèmes de tracking vidéo (e.g Amisco Pro®) (Di Salvo et coll., 2007) puis plus récemment, le global positionning system (GPS) (Randers et coll., 2010) ont permis de quantifier l'activité physique d'un joueur. Ainsi, nous savons aujourd'hui qu'un joueur parcourt en moyenne 10 à 12 kilomètres par match (Di Salvo et coll., 2007 ; Di Salvo et coll., 2013 ; Rampinini et coll., 2007), ce qui correspond à la somme des distances à différentes intensités de course (La marche et le jogging : 0 à 11 km/h ; la course à basse vitesse : 11,1 à 14 km/h ; la course à vitesse modérée : 14,1 à 19 km/h ; la course à haute vitesse : 19,1 à 23 km/h ; et le sprint :>23 km/h ; Di Salvo et coll., 2007). Ces distances sont globalement de 7 000 mètres pour la marche et le jogging, 1 600 mètres pour la course à vitesse basse, 1 900 mètres pour la course à vitesse modérée, 600 mètres pour la course à haute vitesse et 350 mètres pour le sprint. A noter que les milieux de terrains (axiaux et extérieurs) parcourent en moyenne une distance plus grande que les défenseurs latéraux, que les attaquants et que les défenseurs centraux (Table 1).

 CC BY NC ND

Table 1 Moyenne (± écart type) des distances parcourues aux différentes intensités en fonction du poste occupé par le joueur au cours d'un match de 90 min

	0-11 km/h	11.1-14 km/h	14.1-19 km/h	19.1-23 km/h	> 23 km/h
Défenseur central	7080 ± 420	1380 ± 232	1257 ± 244	397 ± 114	215 ± 100
Défenseur latéral	7012 ± 377	1590 ± 257	1730 ±262	652 ±179	402 ± 165
Milieu de terrain axial	7061 ± 272	1965 ± 288	2116 ± 369	627 ± 184	248 ± 116
Milieu de terrain extérieur	6960 ± 603	1743 ± 309	1987 ± 412	738 ± 174	446 ± 161
Attaquant	6958 ± 438	1562 ± 295	1683 ± 413	621 ± 161	404 ± 140

Moyenne des distances parcourue ± l'écart type exprimée en mètres (m), d'après Di Salvo et coll., (2007).

Récemment, l'utilisation de la technologie d'accélérométrie a permis de compléter les analyses vidéos et GPS en dénombrant une quantité de déplacements de courtes distances où les vitesses atteintes sont faibles mais les niveaux d'accélérations très élevés, donc couteux en énergie (Gaudino et coll., 2013). Ainsi, un joueur de football réalise en moyenne par match 75 accélérations et 50 décélérations supérieures à 2 m/s² et d'une durée supérieure à une demi-seconde. De plus un joueur réalise en moyenne entre 900 efforts en accélérations et 750 efforts en décélération (quantifiés en m/s^4, voir Ingebrigsten et coll., 2015). Enfin, les milieux de terrains (axiaux et extérieurs) réalisent plus d'accélérations, de décélérations, d'efforts en accélération et d'efforts en décélérations que les défendeurs latéraux, les attaquants et les défenseurs centraux (Table 2, Ingebrigsten et coll., 2015).

Table 2 Moyenne (± écart type) du nombre d'accélérations, de décélérations, d'efforts en accélération et décélération en fonction du poste occupé par les joueurs au cours d'un match de 90 min.

	Accélération (m/s²)	Décélération (m/s²)	Effort en accélération (m/s^4)	Effort en décélération (m/s^4)
Défenseur central	61 ± 22	40 ± 11	773 ± 227	618 ± 220
Défenseur latéral	85 ± 21	62 ± 13	902 ±231	838 ±275
Milieu de terrain axial	74 ± 21	49 ± 15	824± 259	685 ± 264
Milieu de terrain extérieur	87 ± 25	60 ± 13	1150 ± 401	920 ± 285
Attaquant	74 ± 14	59 ± 18	942 ± 437	854 ± 310

Nombre d'accélérations, de décélérations en m/s² et d'efforts en accélération et décélération en m/s^4 en fonction du poste occupé par les joueurs, d'après Ingebrigtsen et coll., (2015).

L'ensemble de ces déplacements au cours d'un match se répercute sur la Fréquence Cardiaque (FC). Indépendamment du poste, la FC moyenne d'un joueur au cours d'un match est de 85% de sa FC maximale. La FC varie entre moins de 60% et plus de 95% de FC maximale. Les temps passés dans différentes zones de FC en fonction du poste occupé sont présentés Table 3 (Mallo et coll., 2015).

Table 3 Moyenne (± écart type) des fréquences cardiaques et pourcentage du temps passé à différentes intensités de fréquence cardiaque durant un match de football en fonction du poste occupé.

	Moyenne (% FCmax)	**<60% (% FCmax)**	**61 et 70% (% FCmax)**	**71 et 80% (% FCmax)**	**81 et 90% (% FCmax)**	**91 et 95% (% FCmax)**	**> 95% (% FCmax)**
Défenseur central	85.3 ± 5.0	0.7 ± 1.9	5.5 ± 7.0	11.0 ± 8.1	40.7 ± 9.5	39.0 ± 13.9	3.2 ± 3.5
Défenseur latéral	83.0 ± 5.2	0.2 ± 0.4	9.2 ± 7.5	14.3 ± 8.6	45.2 ± 13.2	28.6 ± 14.9	2.6 ± 3.8
Milieu de terrain axial	86.0 ± 4.5	0.4 ± 1.2	3.8 ± 3.1	14.1 ± 8.9	41.1 ± 10.0	37.7 ± 11.1	2.9 ± 3.8
Milieu de terrain extérieur	85.3 ± 5.1	1.5 ± 2.8	7.7 ± 8.0	13.7 ± 10.0	41.4 ± 11.2	30.1 ± 16.4	4.9 ± 4.2
Attaquant	84.3 ± 5.6	1.0 ± 2.7	7.0 ± 6.4	12.5 ± 6.9	44.1 ± 12.2	31.1 ± 12.2	4.0 ± 5.5
Moyenne	84.7 ± 5.1	0.7 ± 2.1	6.6 ± 6.8	13.0 ± 8.4	42.5 ± 11.2	33.6 ±14.2	3.5 ± 4.2

Table 3, %FC max : Pourcentage de la fréquence cardiaque maximale, d'après Mallo et coll., (2015)

Un match de football induit un état de fatigue. La fatigue est définie comme l'incapacité à maintenir une puissance requise ou attendue (Edwards, 1983). Au cours d'un match, la fatigue est d'abord transitoire après une période de jeu très intense puis permanente à la fin de chaque mi-temps (Morh et coll., 2005). Enfin, la fatigue se poursuit dans les heures qui suivent le match (Nédélec et coll., 2012).

Sollicitation au cours d'une saison de compétition

La saison de compétition est précédée d'une période de préparation en général de 5 à 6 semaines durant laquelle les qualités physiques, techniques, tactiques et psychologiques des joueurs sont développées. C'est à cette période de l'année que la charge d'entraînement est la plus importante (Arcos et coll., 2015). Durant la saison de compétition, Les joueurs peuvent jouer un à deux matchs par semaine, pendant 10 mois pour un total de 50 à 80 matchs par an (Morh et coll., 2015). Outre la pratique du football, les voyages (impliqués par la compétition), la qualité du sommeil, le stress psychologique, les carences alimentaires, les infections, l'environnement social sont autant d'éléments qui peuvent induire une fatigue supplémentaire (Meeusen et coll., 2007). L'entraînement a pour but de maintenir les qualités physiques préalablement développées tout en minimisant la fatigue (ou en optimisant l'état de forme physique). Ainsi, chaque semaine, un compromis subtil doit être trouvé entre la récupération et la charge de travail. Lorsque cette dernière est insuffisante, les qualités physiques du joueur diminuent (Force, endurance de force, VO2 max, Plowman et coll., 2007). A contrario, lorsqu'elle est trop importante par rapport à la récupération, l'athlète s'expose à une mésadaptation à l'entraînement plus ou moins chronique : le dépassement ou/puis le surentraînement (Meeseun et coll., 2013). En moyenne durant la saison de compétition, une équipe de football professionnelle s'entraîne environ 5H par semaine (Campos-Vazquez et coll., 2015). En conséquence, la forme physique d'un joueur est le résultat d'une équation complexe entre la charge d'entraînement, la récupération et les différents stress liés à l'environnement du joueur.

Outils pour le suivi de l'entraînement

Pour résoudre cette équation complexe, le suivi tout au long de la saison d'indicateurs de la fatigue ou de la forme permet d'objectiver le niveau d'adaptation des joueurs à la pratique du football (Halson, 2014). Ces indicateurs peuvent être invasifs ou non. Parmi les non-invasifs, les questionnaires subjectifs (Echelle de perception de l'effort), les tests de performances physiques en saut, les données GPS, sont utilisés (Foster et coll., 2001 ; Komi, 2000 ; Ehrmann et coll., 2016). Parmi les invasifs, les bilans sanguins pour le suivi des marqueurs de l'inflammation, du stress oxydant, de la lactatémie sont également utilisés (Halson, 2014). Un bon indicateur doit être reproductible, simple à mettre en œuvre, fiable et donner une information pertinente. L'analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque est un outil susceptible de fournir un tel indicateur.

 CC BY NC ND

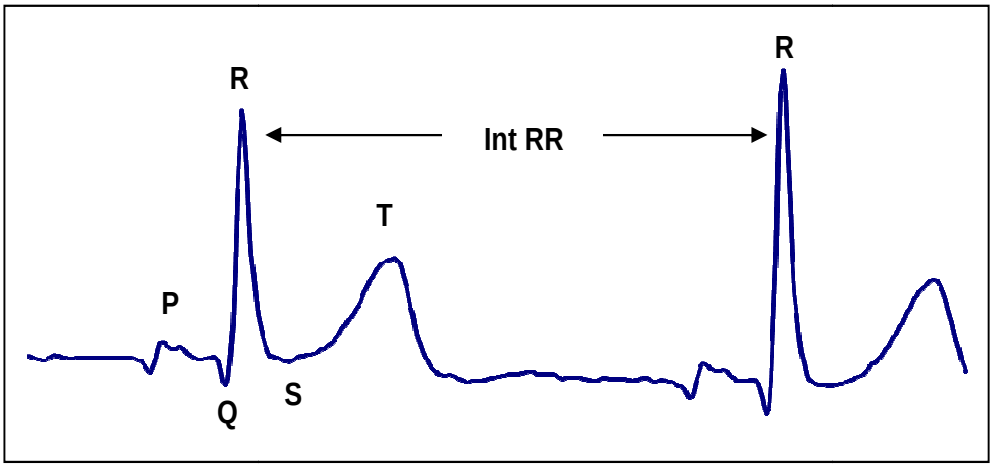
La Variabilité de la Fréquence Cardiaque

La Variabilité de la Fréquence Cardiaque (VFC) est le terme utilisé afin de décrire les variations battement après battement de la fréquence cardiaque (Task Force, 1996). Alors que le système cardio-vasculaire est supposé faire l'objet d'une étroite régulation afin d'assurer la stabilité de ses variables, donc le maintien à leurs valeurs normales et ainsi l'homéostasie, la simple observation du pouls permet de déceler des variations (pseudo) cycliques de la fréquence cardiaque. Cette VFC est le reflet de la mise en œuvre des mécanismes de régulation cardiovasculaire. Son étude est donc une fenêtre sur ces mécanismes de régulation (Task Force, 1996).

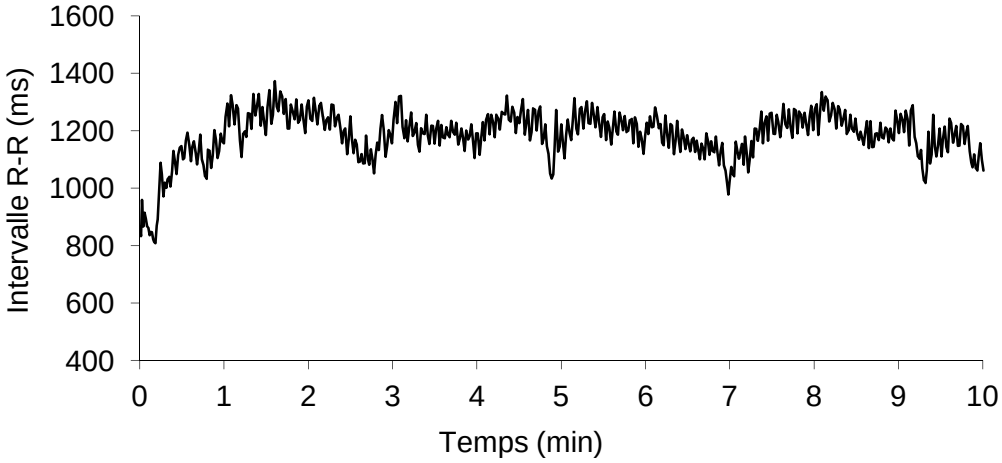
La VFC est simple à mettre en œuvre puisqu'elle ne nécessite qu'un enregistrement de la fréquence cardiaque (FC) battement par battement. Cet enregistrement peut s'obtenir avec fiabilité à l'aide d'un cardiofréquencemètre (Weippert et coll., 2010 ; Barbosa et coll., 2016) (figure 1, Panel B). La VFC décrit les variations instantanées de la fréquence cardiaque ou plus précisément de l'intervalle entre deux pics R consécutifs (Task Force, 1996). Le pic R est visualisé sur un électrocardiogramme au sein du complexe QRS (Figure 1, panel A). La VFC renseigne indirectement le contrôle qu'exerce le Système Nerveux Autonome (SNA) sur la fonction cardiaque. Le SNA, constitué d'une branche parasympathique et d'une branche sympathique innerve un grand nombre d'organes dont le cœur. Les influences parasympathiques cardiomodératrices diminuent la FC alors que les influences sympathiques cardioaccélératrices, l'augmentent (Dong, 2016).

Figure 1 : Illustration d'un électrocardiogramme (Panel A) et enregistrement la variabilité de la fréquence cardiaque (Panel B)

Panel A)



Panel B)



Panel A) Illustration d'un électrocardiogramme. L'onde P est associée à la contraction auriculaire, le complexe QRS à la contraction ventriculaire et l'onde T à la repolarisation ventriculaire. Int RR : intervalle entre deux pics R. Panel B) Enregistrement de la variabilité de la fréquence cardiaque (mesurée en intervalle RR, soit l'intervalle entre deux battements cardiaque, l'inverse de la fréquence cardiaque) le matin au repos dans la position couché. ms : milliseconde ; min : minute.

L'enregistrement de la FC destiné à l'étude de la VFC peut être réalisé selon différentes procédures. Dans les sciences du sport, les enregistrements ont lieu le matin au réveil (Plews et coll., 2013), après un exercice sous maximal (Stanley et coll., 2013) ou encore durant la nuit pendant le sommeil (Vesterinen et coll., 2015). A noter également que la VFC peut être utilisée durant un effort pour déterminer les seuils ventilatoires au cours d'un test incrémental maximal en course à pied (Cottin et coll., 2007) (Cette utilisation de la VFC n'est pas abordée dans ce travail mais il pourrait procurer des éléments permettant d'affiner le suivi des footballeurs). La durée d'enregistrement varie de quelques minutes pour les enregistrements le matin au réveil ou après un exercice sous maximal à plusieurs heures pour les enregistrements la nuit durant le sommeil. Enfin, la position d'enregistrement peut également varier. L'enregistrement est réalisé couché, assis ou debout (Perini et coll., 1993 ; Abad et coll., 2015).

L'étude de la VFC consiste à analyser la succession d'intervalle de temps entre deux pics R consécutifs (Task Force, 1996). Parmi les méthodes mathématiques développées pour analyser la VFC, celles dites linéaires comprennent le domaine temporel, fréquentiel et géométrique (Vanderlei et coll., 2009 ; Tupplo et coll., 1996) et celle dites non linéaires comprennent entre autres, l'analyse spectrale à redondance multiscalaire (Yamamoto et Hughson, 1995), L'entropie de Kolmogorov, l'exposant de Lyapunov, la dimension de corrélation D_2, la prédiction non-linéaire de Sugihara et May, les coefficients d'asymétrie, … (Sugihara et May 1990 ; Task Force, 1996 ; Seely et Macklem, 2004). Les méthodes linéaires et notamment le domaine temporel et fréquentiel sont le plus souvent utilisées dans les sciences du sport (Dong, 2016). L'analyse temporelle fournit des marqueurs principalement parasympathiques via des calculs statistiques de la série d'intervalle RR. L'analyse fréquentielle fournit à la fois des marqueurs parasympathiques et sympathiques via une analyse spectrale de la série d'intervalle RR. (Des précisions concernant, les indicateurs et leur signification physiologique seront apportées dans la partie méthode).

 CC BY NC ND

La variabilité de la fréquence cardiaque et l'entraînement sportif

VFC et charge d'entrainement

La VFC et notamment les indicateurs parasympathiques sont sensibles à l'entraînement aérobie (Melanson et Freedson, 2001 ; Carter et coll., 2003). Cependant, plus les sujets sont âgés, moins la VFC est sensible à l'entraînement aérobie (Aubert et coll., 2003). De la même manière Aubert et coll., (1996), ont montré que les athlètes en endurance ont une activité parasympathique supérieure aux sédentaires. Dans une autre étude, chez des sujets sédentaires, la pratique hebdomadaire du « rugby touch » (contacts entre joueurs limités) augmente l'activité parasympathique (Filliau et coll., 2015). Ce résultat ne se vérifie pas chez des joueurs de rugby réguliers (Aubert et coll., 2001). Lors d'études longitudinales chez des athlètes amateurs (course à pied et natation), dans un premier temps, l'augmentation de la charge d'entraînement puis dans un second, la réduction de la charge d'entraînement, diminue et augmente respectivement les indicateurs fréquentiels parasympathiques de la VFC (Pichot et coll., 2000 ; Garet et coll., 2005). D'autres ne montrent aucune modification de la VFC après une augmentation de la charge d'entraînement de 50% durant 6 jours chez des canoéistes (Hedelin et coll., 2000). Enfin, chez des athlètes de haut niveau en aviron, VFC augmente lorsque la charge d'entraînement est augmentée de 75%. En revanche, lorsque la charge d'entraînement est augmentée de 100%, VFC diminue et les indicateurs sympathiques prévalent (Iellamo et coll., 2002). Plus récemment, les indicateurs parasympathiques se sont montrés pertinents pour définir un programme d'entraînement (Kiviniemi et coll., 2007 ; Vesterinen et coll., 2016). Kiviniemi et coll., (2007) ont montré que l'adaptation à l'entraînement était meilleure lorsque l'intensité de la charge d'entraînement était définie au préalable par les indicateurs parasympathiques fréquentiels de la VFC. De la même manière, Vesterinen et coll., (2015) ont montré, chez des coureurs à pied, que les indicateurs parasympathiques fréquentiels de la VFC permettent de prédire la capacité d'adaptation des athlètes à un type d'entraînement (intensité vs volume). En d'autres termes, le profil de VFC d'un athlète peut conditionner son programme d'entraînement (Kiviemi et coll., 2007 ; Vesterinen et coll., 2015 ; Vesterinen et coll., 2016).

 CC BY NC ND

VFC et fatigue

La VFC permet également d'identifier des états de fatigue. Schmitt et coll., (2015) ont identifié, à partir de l'analyse spectrale de la VFC, quatre profils de fatigue. Profil 1 : diminution des hautes fréquences (HF) et basses fréquences (BF) couché (respectivement -70% et -46%) associée à une diminution de HF et BF debout (respectivement -43% et – 53%) ; Profil 2 : Augmentation de BF couché (+190%) et diminution de BF debout (-84%) ; Profil 3 : Diminution de HF couché (-72%) et augmentation de HF debout (+501%) ; Profil 4 : augmentation de HF debout (+2161%). Le Meur et coll., (2013) associe également une hyperactivité parasympathique à un état de surentrainement. Enfin, Mourot et coll., (2004) montre qu'après un exercice intermittent, persiste une diminution de la VFC uniquement dans la position debout. VFC peut à l'inverse, prédire la performance. Ainsi, en natation et en course à pied, les indicateurs parasympathiques obtenus par analyse fréquentielle sont corrélés à la performance en natation et en course à pied (Altaoui et coll., 2007 ; Schmitt et coll., 2006 ; Vesterinen et coll., 2013).

 CC BY NC ND

VFC : quel indicateur utiliser ?

Récemment, différents travaux ont abordé l'aspect méthodologique de la VFC en préconisant l'utilisation de l'indicateur parasympathique issu du domaine temporel RMSSD : Root Mean Square of Successive Differences (Buchheit 2014, Plews et coll., 2013) au profit des indicateurs issus de l'analyse fréquentielle. RMSSD est simple à calculer, ne nécessite que quelques minutes d'enregistrement (Nakamura et coll., 2015), et est moins sensible à la fréquence respiratoire, au bruit, ainsi qu'aux variations journalières (Buchheit, 2014). RMSSD est présenté par ses utilisateurs selon différentes modalités. Outre sa forme brute, certains utilisateurs préfèrent sa transformation logarithmique (Ln RMSSD) ou sa forme moyennée sur une semaine (Ln RMSSDweekly). La transformation logarithmique a pour objectif d'obtenir une distribution normale de la variable ainsi transformée. Effectivement, RMSSD dans sa version brute présente des valeurs basses qui sont limitées par 0 alors que les valeurs hautes peuvent se disperser théoriquement jusqu'à l'infini. La distribution de ces valeurs est donc distordue vers les hautes valeurs. La transformation logarithmique atténue cette distorsion et autorise donc l'utilisation des outils statistiques qui requièrent la normalité de la distribution. La forme moyennée sur une semaine a pour objectif d'atténuer la grande variabilité intra-individuelle de cet indicateur (Task Force, 1996 ; Plews et coll., 2013). RMSSD, sa version logarithmique (Ln RMSSD) ou sa version moyennée (Ln RMSSDweekly) se sont ainsi largement répandus. Chez des coureurs à pied, les modifications de RMSSD sont associées aux modifications de la performance (Buchheit et coll., 2010) et les modifications journalières de Ln RMSSD permettent d'identifier l'adaptation d'un athlète de haut niveau (Plews et coll., 2016). Récemment utilisé lors du suivi longitudinal de footballeur de haut niveau, Ln RMSSD après un effort sous maximal n'est pas pertinent pour identifier l'adaptation des joueurs à la charge d'entraînement (Thorpe et coll., 2015 ; Thorpe et coll., 2016). De la même manière, Ln RMSSDweekly lors d'enregistrement le matin au réveil n'est pas corrélé à la charge d'entraînement perçue chez des joueurs professionnels de futsal (Nakamura et coll., 2016). En revanche lors d'enregistrements le matin au réveil, durant une pré-saison, Ln RMSSDweekly est corrélé à la charge d'entraînement perçue (r=0.85) ainsi qu'à la fatigue perçue (r=0.56) chez des footballeuses de haut niveau (Flatt et coll., 2016).

Justification de notre travail

Le paragraphe précédent souligne l'intérêt et la pertinence des indicateurs parasympathiques de la VFC dans la position couché lors du suivi des athlètes au cours d'un programme d'entraînement. Récemment, dans le football, pour des raisons pratiques notamment (enregistrement très court, ≤ 5 minutes et indicateur simple à calculer), l'indicateur temporel de la VFC, RMSSD ou ses versions transformées, Ln RMSSD ou Ln RMSSDweekly sont préconisés (Esco et coll., 2016 ; Nakamura et coll., 2016). Cependant les résultats demeurent toutefois contradictoires (Flatt et coll., 2016 ; Nakamura et coll., 2016 ; Thorpe et coll., 2016).

Le football est un sport intermittent. Ces sports impliquent une succession aléatoire de périodes de faible intensité autorisant une relative récupération et de périodes très intenses pouvant être assimilées à la réponse « fight or flight ». Cette dernière sollicite la réactivité du système sympathique (Jansen et coll., 1995). En théorie, il y a donc un intérêt à évaluer la branche sympathique du SNA durant un test d'activation. Le test de lever actif ou stand test, qui se caractérise par le passage de la position couché à debout est un test d'activation reconnu mettant en jeu le SNA (Task Force, 1996).

Plus Précisément, lors du passage à la position debout, la gravité implique une adaptation de l'organisme à la chute du volume sanguin dans les extrémités déclives du corps (Olufsen et coll., 2008). La diminution du retour veineux, du volume d'éjection systolique, de la pression artérielle et par conséquent de la perfusion cérébrale (Shoemaker et coll., 2001) implique la mise en œuvre des mécanismes de régulation du système cardio-vasculaire et en particulier du baroréflexe (Sheperd et Mancia, 1986). Ce dernier entraîne une diminution de l'activité du système parasympathique à priori très rapide (de l'ordre du battement cardiaque chez l'homme) et une activation du système sympathique qui nécessite, elle, plusieurs battements cardiaques (Elghozi et Julien, 2007). Cela se caractérise par une augmentation de la fréquence cardiaque, de la contractilité et des résistances vasculaires périphériques (Olufsen et coll., 2008). D'un point de vue de la VFC, le passage en position debout a un impact sur les indicateurs du domaine fréquentiel, ceux de l'activité parasympathique diminuent alors que ceux de l'activité sympathique augmentent (Task Force, 1996 ; Sharma et coll., 2009). Ainsi la VFC lors du passage à la position debout peut fournir des informations concernant la réactivité sympathique (Grassi et Esler, 1999).

D'autres techniques, plus précises et plus directes permettent une quantification précise de l'activité sympathique comme la mesure de l'activité nerveuse sympathique musculaire ou le dosage des catécholamines. Cependant, ces techniques d'évaluation de l'activité sympathique sont difficiles à réaliser et peu compatibles avec des expérimentations de terrain (Grassi et Esler, 1999).

Hypothèse

Nous émettons l'hypothèse qu'une évaluation de la réactivité sympathique lors du passage à la position debout est un meilleur indicateur de l'adaptation à l'entraînement dans le contexte des sports intermittents contrairement aux sports d'endurance où l'évaluation de la modulation parasympathique de la fréquence cardiaque a montré son intérêt.

 CC BY NC ND

Méthodes

Sujets

Les sujets de l'étude étaient les joueurs professionnels du Stade Lavallois Mayenne FC entre 2010 et 2015. En moyenne, au cours des cinq saisons le groupe de joueurs était constitué de 23 joueurs de champ. Les caractéristiques anthropomorphiques de chacun des groupes étudiés seront détaillées dans chacune des études présentées. L'ensemble des études impliquant les joueurs a bénéficié de l'avis favorable du Comite d'Ethique d'Angers.

Matériel

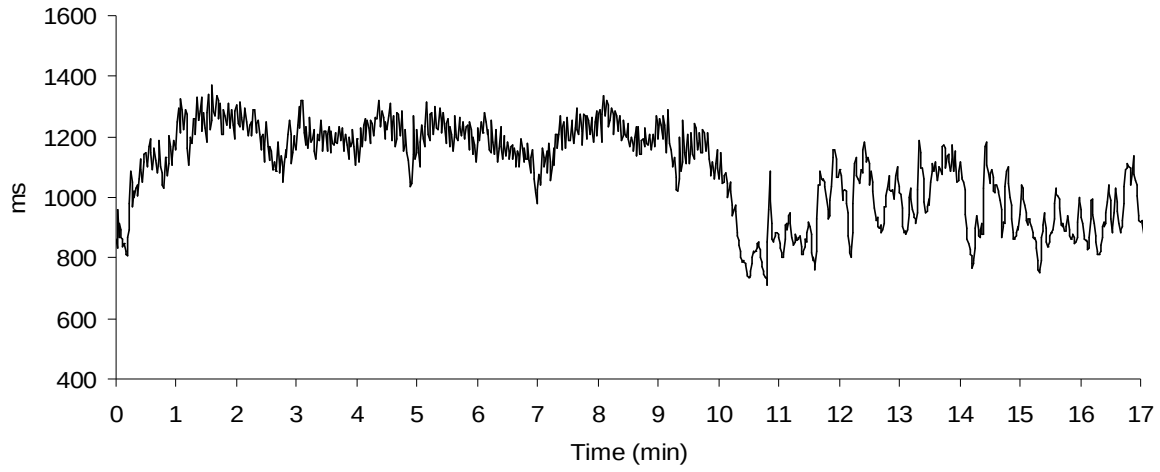
Nous avons, pour l'ensemble de nos travaux, réalisé des enregistrements de la fréquence cardiaque battement par battement à l'aide de cardiofréquencemètres Polar Team2 (Polar®, Finlande). Ces instruments numérisent l'électrocardiogramme à une résolution de 1 000 Hz et déterminent l'intervalle RR de l'électrocardiogramme à la milliseconde près. Ces performances techniques sont supérieures aux minimales requises par les consensus d'experts en ce qui concerne l'analyse de la VFC (Rompelman, 1986 ; Task Force, 1996).

Test de lever actif

Les enregistrements étaient réalisés 10 minutes en position allongée suivi de 7 minutes en position debout lors d'un test de lever actif (stand test) (Figure 1). Ils étaient effectués le matin à jeun entre 8H et 9H et il était demandé aux joueurs de ni parler, ni bouger. La respiration ainsi que la pression artérielle n'ont pas été contrôlées durant ces expériences de terrain.

 CC BY NC ND

Figure 1 Enregistrement de la fréquence cardiaque battement par battement lors d'un test de lever actif



Exemple d'enregistrement de la fréquence cardiaque (intervalle RR sur l'axe des Y) battement par battement Durant un test de lever actif (10 minutes en position couché suivi de 7 minutes en position debout). Les intervalles RR sur l'axe des Y est en millisecondes (ms) et le Temps sur l'axe des X en minutes (min)

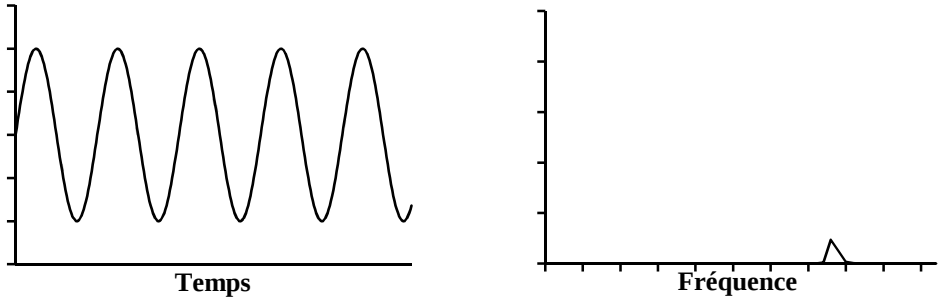
Analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque

Nous avons effectué une analyse du domaine temporel et fréquentiel à l'aide du logiciel Nevrokard (Nevrokard®, Medistar, Ljubljana, Slovénie) (voir Annexe) dans le but d'estimer l'activité du SNA. Concernant le domaine temporel, nous avons déterminé uniquement l'indicateur parasympathique RMSSD (root mean square of successive differences) et/ou sa version logarithmique (Ln RMSSD) comme il est récemment recommandé (Buccheit, 2014 ; Plews et coll., 2013). Concernant le domaine fréquentiel, nous avons déterminé la puissance spectrale au moyen d'une analyse spectrale de 512 valeurs d'intervalles RR après un ré-échantillonnage à 2Hz pour les 5 dernières minutes de l'enregistrement en position couché et debout. Le filtrage des artefacts et extrasystoles a été réalisé manuellement au préalable (aHRV software, Nevrokard®, Medistar, Ljubljana, Slovénie).

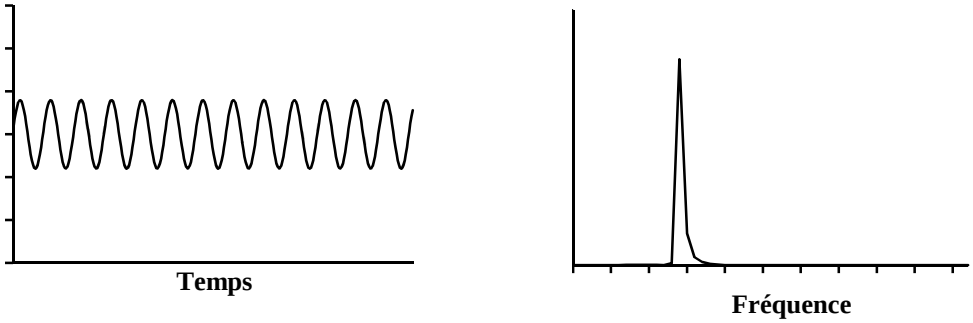
L'analyse spectrale désigne l'ensemble des méthodes qui permet de mettre en évidence les composants périodiques d'un signal. Dans notre cas, le logiciel Nevrokard applique directement la transformée rapide de Fourier (Version informatisée de la méthode d'analyse spectrale du nom de son inventeur, Joseph Fourier) à la série d'intervalle RR. « La transformée de Fourier consiste à considérer la variabilité d'un paramètre comme la somme de plusieurs fonctions sinusoïdales dont elle tente de déterminer leur fréquence respective.» (Fortrat, 1998) (Figure 2, d'après Fortrat, 1998)

Figure 2 Illustration de la transformée de Fourier

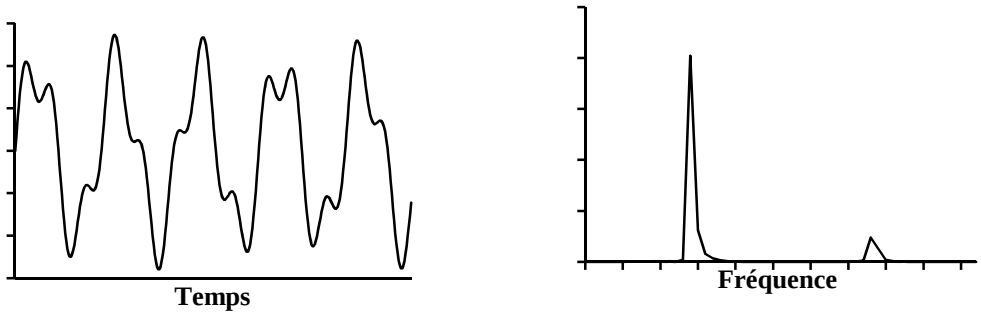
sin(i)



sin(i x 2.5) / 2.7



sin(i) + sin(i x 2.5) / 2.7



Principe de la transformée de Fourier. Cette transformation mathématique, aussi appelée analyse spectrale, permet de décomposer un signal en sinusoïdes. La somme de sin(i) et sin(i x 2.7) / 2.5 n'est pas aisément identifiable dans le domaine temporel (en bas à gauche), elle le devient dans le domaine fréquentiel après transformation de Fourier (en bas à droite). (D'après Fortrat, 1998).

Indicateurs fréquentiels de la variabilité de la fréquence cardiaque

Comme recommandé par la Task Force (1996), l'analyse du domaine fréquentiel a consisté à obtenir le spectre de la composante harmonique très basses (TBF ≤ 0.04 Hz), basses (0.04 Hz ≤ BF ≤ 0.15 HZ) et hautes (0.15 ≤ HF ≤ 0.40 Hz) fréquences afin d'établir la puissance spectrale associée (m^2/Hz) ainsi que la puissance totale (ou variabilité globale de VFC, T ≤ 0.4 Hz). BF et HF normalisés (BFnu et HFnu respectivement, sans unité) sont le résultat des calculs suivants : BFnu = BF/(BF+HF) et HFnu = HF/(BF+HF). Ces deux valeurs peuvent être multipliées par 100 de façon à les exprimer en pourcentage. Le ratio BF/HF est le résultat de la division de la puissance spectrale des basses fréquences et des hautes fréquences. Enfin pour certaines de nos études, nous avons pu calculer le logarithme associé à TBF, BF, HF, BFnu, HFnu et BF/HF (respectivement, logTBF, logBF, logHF, logBFnu, logHFnu et log BF/HF). La Task Force (1996) définie également les ultra basses fréquences (0 à 0.003 Hz). Cependant, ces dernières nécessitent des enregistrements de longue durée (24H) afin d'être correctement analysées (Task Force, 1996). Nous ne les avons donc pas analysées dans nos travaux.

 CC BY NC ND

En accord avec la Task Force (1996), L'indicateur HF est sous influence parasympathique du SNA alors que BF est sous influence sympathique et parasympathique. Les indicateurs dérivés des hautes fréquences sont donc considérés comme un reflet de la branche parasympathique du SNA et ceux dérivés des basses fréquences comme reflet de la branche sympathique (Task force, 1996). Cependant l'interprétation de ces indicateurs n'est pas aussi simple que cela (Task Force, 1996). Effectivement, ces indicateurs ne représentent pas directement l'activité nerveuse de cette branche parasympathique et sympathique (Task Force 1996). HF est également influencé par la fréquence respiratoire (Vanderlei et coll., 2009) et BF est également influencé par le système parasympathique et par le baroréflexe (Elghozi et Julien, 2007 ; Moak et coll., 2009). L'interprétation de ces BF est donc contestée dans la littérature (voire la revue de Goldstein et coll., 2011). Cependant, les modifications observées des BF lors du passage à la position debout au cours d'un test de lever actif reflète l'adaptation du système sympathique à cette nouvelle position (Task Force, 1996 ; Grassi et Esler, 1999 ; Sharma et coll., 2009). HF et BF peuvent être normalisés en fonction de la puissance totale (T), approximée par BF + HF afin d'éviter les effets confondants de la variabilité globale de VFC et des modifications de la FC. HF normalisé et BF normalisé sont respectivement des indicateurs de l'influence parasympathique et sympathique (HFnu et BFnu). Le ratio BF/HF est un indicateur de la balance nerveuse autonome entre le système sympathique et parasympathique. Le sens des VLF demeure peu clair. Bien que les VLF ne puissent pas être correctement évaluées durant les enregistrements à court terme (quelques minutes), la Task Force (1996), recommande de les mentionner systématiquement dans toute étude utilisant l'analyse spectrale de la VFC.

Contributions personnelles

Dans un premier temps nous nous sommes attachés à faire le point sur l'utilisation de l'analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque par les grands clubs européens de football. Ce travail était aussi l'occasion de faire une revue de la littérature quant à la justification d'une telle utilisation (étude 1). Nous avons ensuite souhaité vérifier la faisabilité du suivi longitudinal de footballeurs professionnels à l'aide de VFC au cours d'une saison (étude 2). Suite à ce travail, nous avons voulu vérifier notre hypothèse, à savoir un meilleur reflet de l'adaptation à l'entraînement par la VFC en position debout par rapport aux marqueurs classiques obtenus en position couché, au cours d'une pré-saison de 5 semaines (étude 3). Enfin, suite à des observations de terrain, nous avons tenté de montrer une relation entre les indicateurs fréquentiels de la VFC en position debout et la perception de la forme physique des joueurs en compétition (étude 4).

Préambule à l'étude 1

L'innovation technologique et notamment le développement de cardio-fréquencemètres a rendu accessible au plus grand nombre le monitoring de la fréquence cardiaque y compris sur le terrain lors de la pratique sportive. Ces appareils permettent aujourd'hui non seulement d'afficher la fréquence cardiaque instantanée mais aussi d'enregistrer cette fréquence cardiaque battement par battement avec fiabilité et reproductibilité. Ce type d'enregistrements, appelé séries chronologiques est la porte ouverte à leur analyse par des méthodes de traitement du signal. Ces enregistrements et leur analyse prennent le nom général de Variabilité de la Fréquence Cardiaque (VFC). Le développement de la cardio-fréquencemétrie s'accompagne de celui de logiciels d'analyse de la VFC qui permettent d'accéder facilement aux différents indicateurs de la VFC qu'ils soient issus du domaine temporel, fréquentiel ou géométrique.

Alors que dans un premier temps les études sur la VFC se sont intéressées aux sports d'endurance, de plus en plus d'études s'intéressent à la VFC dans des activités intermittentes et en particulier le football. Par expérience, nous savons que les équipes médicales dans les clubs professionnels de football sont à l'affût des nouvelles technologies permettant d'évaluer l'adaptation des joueurs à la charge d'entraînement. Nous avons donc souhaité enquêter auprès des clubs de football européens de 1ère division à l'aide d'un questionnaire quant à l'utilisation de la VFC dans le suivi de leurs joueurs. De plus, nous avons souhaité associer l'outil « fréquence cardiaque de récupération » à notre enquête car il est d'application facile et permet d'identifier la réactivité parasympathique à partir d'un enregistrement de la FC. Il est donc utilisé par ces clubs professionnels de football.

Cette étude, était l'occasion de réaliser une revue bibliographique des différentes procédures d'enregistrement de la FC battement par battement et des différentes méthodes mathématiques d'analyse de la VFC les plus répertoriées dans les sciences du sport. De plus, en comparant l'utilisation de la VFC par les clubs de football avec les récents travaux publiés, nous avons évalué la pertinence des procédures utilisées par les clubs au regard des données de la littérature.

Etude 1

Heart rate recovery and heart rate variability:

Use and relevance in European Professional Soccer

G. RAVE[1], J.O. FORTRAT[2], B. DAWSON[3] & H. ZOUHAL[4]

[1]*Stade Lavallois MFC*, Plaine des Gandonnières rue Coupeau 5300 Laval, *France*

[2]*CNRS 6214 Inserm* 1083 Faculté de Médecine 49045 Angers, *France*

[3] *School of Sport Science, Exercise and Health*, University of Western Australia, Crawley, Australia

[4]*Movement, Sport and health Sciences laboratory* (M2S). UFR-APS, University of Rennes 2-ENS Rennes. Avenue Tillon, CS 24414, 35044 Rennes Cedex

Science and Medicine in Football

Soumis

Fréquence cardiaque de récupération et variabilité de la fréquence cardiaque : Utilisation et pertinence dans le football professionnel européen

Résumé

But - L'objectif de cette étude est de 1) réaliser un état des lieux de l'utilisation des clubs de football professionnel en Europe du monitoring de la Fréquence Cardiaque de Récupération (FCR) et de la variabilité de la fréquence cardiaque, puis, 2) analyser ces pratiques au regard de la littérature.

Méthode - Un questionnaire a été envoyé aux 137 clubs évoluant en premières divisions Européennes pour la saison 2015/2016. Le questionnaire a pour but d'identifier la procédure d'utilisation de la FCR et la VFC. 53% des clubs ont répondu au questionnaire.

Résultats - 50% utilisent la FCR et 36% utilisent la VFC. 47% qui n'utilisent pas la FCR la jugent sans intérêt. 54% qui n'utilisent pas la VFC la jugent trop contraignante. 28 et 24 procédures d'utilisation de la FCR et la VFC sont respectivement répertoriées. La VFC le matin au repos et après un effort sous maximal standardisé sont les plus représentées. Les indicateurs parasympathiques de la VFC sont les plus utilisés. L'utilisation de la FCR et la VFC n'est pas consensuelle. La FCR ne semble pas appropriée au contexte du football contrairement à la VFC le matin au réveil en position couché et debout.

Conclusion – Le manque de consensus souligne la nécessité d'identifier la meilleure procédure de détermination de la VFC et de la rendre moins contraignante pour les clubs.

Mots-clés *cardiofréquencemètre, charge d'entraînement, fatigue, parasympathique, RMSSD, système nerveux autonome*

Heart rate recovery and heart rate variability: Use and relevance in European professional soccer

Abstract

Purpose - The objective of this study was 1) to draw up an inventory of the use of Heart Rate Recovery (HRR) and Heart Rate Variability (HRV) by professional football clubs in Europe, then 2) analyse these practices in relation with the published clinical data

Methods – A questionnaire was sent to 137 clubs playing in the top European divisions for the 2015/2016 season. The questionnaire had the aim of identifying the procedure for use of HRR and HRV

Results – 53% of clubs responded. Of these, 50% use HRR and 36% use HRV; 47% that do not use HRR deem it to be of no interest and 54% that do not use HRV deem it too restrictive. A total of 28 and 24 procedures for use of HRR and HRV are respectively listed. Resting HRV in the morning and after standardised submaximal effort are the most represented, with the parasympathetic indicators of HRV most used. The use of HRR and HRV is not widespread or consensual. Using HRR doesn't seem appropriate to the context of football, with limited use of HRV in the morning on waking in the supine and standing positions

Conclusion - The lack of consensus noted here stresses the need to identify the best procedure to determine HRV and to make it more practical for use by the clubs.

Keywords *Autonomic nervous system, fatigue, mobile heart rate monitor, parasympathetic, RMSSD, training load*

1. Introduction

A football season lasts between 9 and 11 months. A professional player plays once or twice a week for a total of 50 to 80 matches per year (Morh et al., 2016). Producing an optimal level of performance of the players and protecting their physical integrity throughout the season is therefore a regular challenge faced by the sports medicine staff of clubs. It is therefore essential to have reliable indicators of the individual players' adaptation to the training and playing load. A huge number of scientifically validated tools are available to the staff. Neuromuscular assessments (e.g. counter movement jump, tensiomyography), physical data (e.g. distances travelled, number of accelerations), subjective data of perceived training load (e.g. Rating of Perceived Exertion) and recovery stress questionnaire (e.g. REST-Q) are used to monitor the players' level of adaptation to the training/game loads (Halson, 2014).

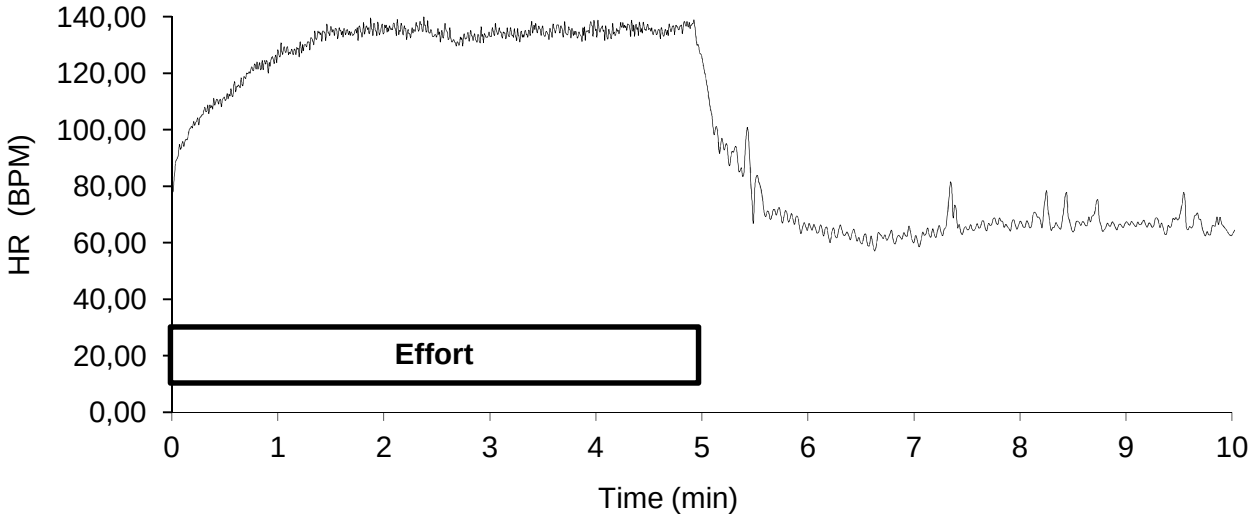
Furthermore, the Autonomic Nervous System (ANS) regulates the major functions of the body through its parasympathetic and sympathetic influences (Wehrwein, Orer, & Barman, 2016). Practising a regular physical activity has an impact on the ANS (Aubert, Seps, & Beckers, 2003); for example, cardiac function is affected by the ANS, with parasympathetic influences reducing the heart rate (HR), and sympathetic influences increasing it (Dong, 2016). Two tools have recently made it possible to directly characterise the activity of the ANS through monitoring the HR: the Heart Rate Recovery (HRR) and the Heart Rate Variability (HRV) indexes.

The HRR characterises the parasympathetic reaction associated to the withdrawal of the sympathetic activity of the ANS through monitoring the HR pre- and post-effort (Figure 1, Panel A) (Borresen & Lambert, 2008). The HRR is the difference between the HR measured just before the end of the effort and that of the recovery. The procedures vary and the recovery HR can be determined 20 seconds, 30 seconds, 1 minute, 2 minutes, 3 minutes, 4 minutes or 5 minutes post-effort (Del Rosso, Nakamura, & Boullosa, 2016). The HRV, recorded from monitoring the HR beat by beat (Figure 1, Panel B), characterises both the parasympathetic and sympathetic influences of the ANS.

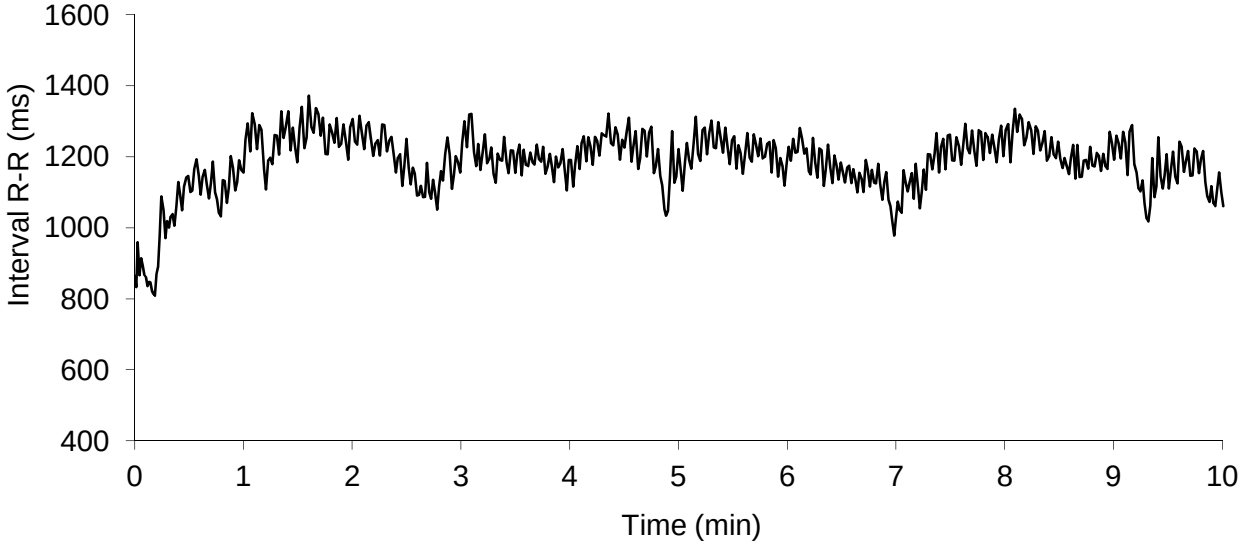
 CC BY NC ND

Figure 1 Monitoring of the Heart Rate Recovery (Panel A) and the Heart Rate Variability (Panel B)

Panel A)



Panel B)

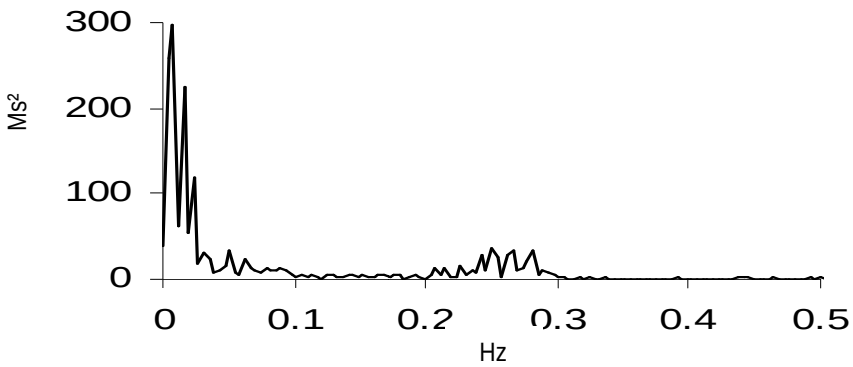


Panel A) Monitoring of the Heart Rate Recovery after submaximal exercise in running. Panel B) Monitoring of the Heart Rate Variability (measured in RR interval, which is the interval between two heart beats, the opposite to heart rate) in the morning at rest in the supine position. HR: Heart Rate; bpm: Beat per minute; ms: millisecond.

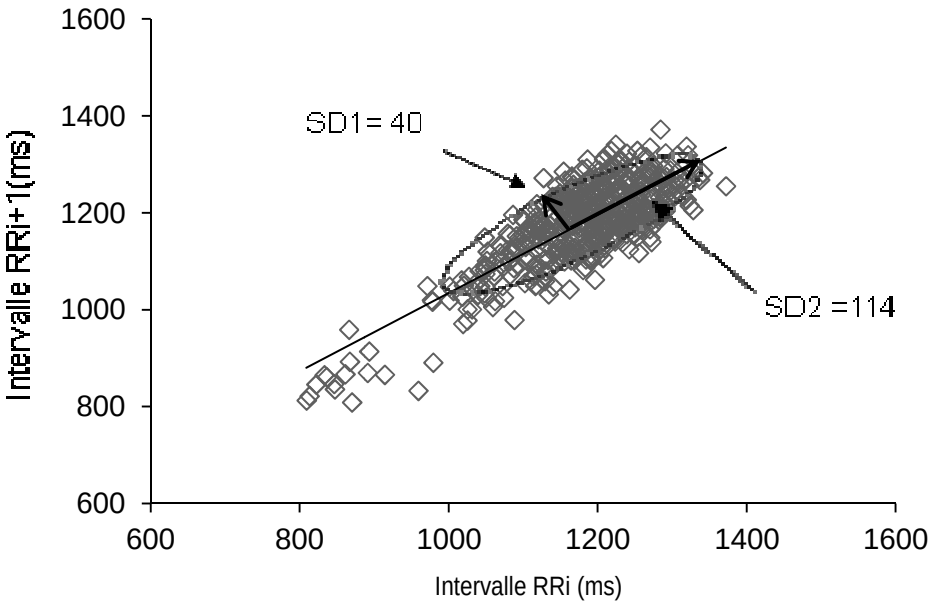
Several mathematical analyses of the recording can be used, including time analysis, spectral analysis (Figure 2, Panel A) and the Poincaré plot analysis (Figure 2, Panel B) (for technical precision, see: Task Force, 1996; Dong, 2016; Tupplo, Makikallio, Takala, Seppanen, & Huikuri, 1996), which are particularly referenced in sports science applications (Plews et al., 2014; Mourot, Bouhaddi, Perrey, Rouillon, & Regnard, 2004; Schmitt et al., 2013).

Figure 2 Example of frequency analysis of the HRV (Panel A) and Poincaré plot analysis (Panel B)

Panel A)



Panel B)



Analyses of HRV conducted on a cardiometer in the morning at rest, supine position. Panel A) Frequency analysis represented by a spectrum, and Panel B) Analysis with the Poincaré plot method. Each plot (x,y) is placed using two adjacent RR intervals (RRi,RRi+1). SD1 (Standard Deviation 1) and SD2 (Standard Deviation 2) are the calculation of the standard deviations according to the small axis and the large axis, respectively the point cloud.

The monitoring may be undertaken after effort, at night while asleep, and in the morning on waking, and the monitoring position can be supine, sitting or standing (Perini et al., 1993; Abad et al., 2015). The durations of monitoring can vary from a few minutes (short term recording) to several hours (long term recording), according to the time of recording and the mathematical analysis chosen. Measures of HRR and HRV are widely used in sports science because the monitoring can be undertaken directly in the field using a mobile heart rate monitor as reliably as in the laboratory (Giles, Draper, & Neil, 2016). They are therefore non-invasive, cheap, and reproducible. The HRR and HRV were initially studied in aerobic sports, where they showed their ability to monitor the level of adaptation of individual athletes to training loads, and predict performance (Plews, Laursen, Stanley, Kilding, & Buchheit, 2013; Schmitt et al., 2006; Vesterinen et al., 2015). Gradually, their use was extended to other disciplines, including intermittent sports such as football.

The purpose of this work was to investigate and record the use of HRR and HRV in very high level football clubs in Europe by using a questionnaire, and then to analyse the relevance of these practices with regard to recent studies.

2. Method

2.1. Design

All clubs (n = 137) of the top French, English, Italian, Spanish and German divisions, plus clubs playing in other European championships but having qualified for the Europa League and the Champions League for the 2015/2016 season, received the questionnaire as a "google form". This was sent to the clubs by email, initially in February 2016, then until May 2016. Reminder emails were monthly sent to the clubs that didn't reply.

 CC BY NC ND

2.2. Questionnaire

The questionnaire comprised 2 parts. The first concerned the use of HRR and the second the use of HRV. The HRR part comprised 8 items in the case of positive response to the question "Do you use HRR in monitoring your professional footballers?" and 1 item in the case of a negative response. The HRV part comprised 10 items in the case of positive response to the question "Do you use HRV in monitoring your professional footballers?" and 1 item in the case of a negative response. For all items, a multiple choice answer was possible, and also the option of an open answer if none of the suggestions was considered appropriate. The questionnaire can be accessed on the internet at:
(https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSd0_Tpr_GdjBgUmAjNRnD6K21MNfJmVizaxAYySZZIv6eKONA/viewform)

The questionnaire had the aim of identifying the key elements of the procedures used by each of the clubs. In the case of HRR, these elements were the posture of the player upon recording (supine, standing or sitting), the duration of exercise pre-recording, the type of exercise and the time and frequency of recording the HR. Concerning HRV, these elements were the posture of the player upon recording (supine, standing, sitting, or supine then standing), the duration of stabilisation or exercise pre-recording of the HR, the duration of recording the HR, the mathematical method of analysis, the indicators used, and the frequency of the recordings. Furthermore, we asked the clubs what actions they instigated according to the results obtained upon measuring the HRR and HRV.

The mathematical analyses of HRV mentioned in the questionnaire, their associated indicators and their meaning are presented in Table 1.

 CC BY NC ND

Table I Method of mathematical analysis of the Heart Rate Variability, associated indicators and their meaning

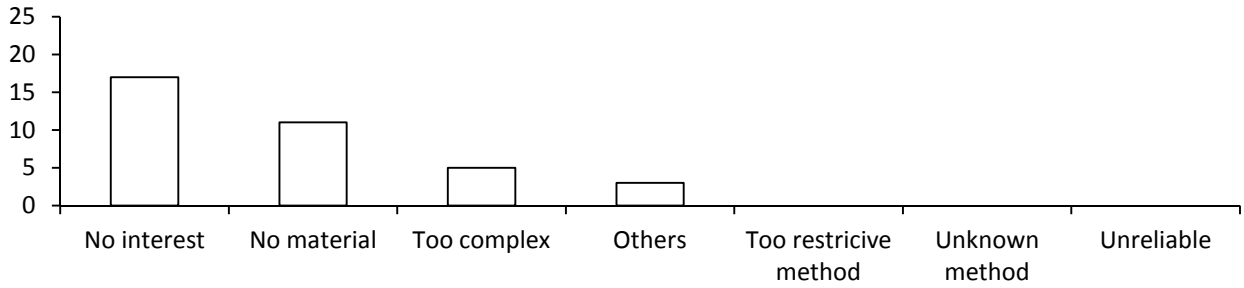
Analysis	Indicators	Meaning
Temporal Domain		
Mean NN (ms)	Mean of NN interval	
SDNN (ms)	Standard Deviation of NN interval	Global variability
RMSSD (ms)	Root mean square of successive differences of NN interval	Parasympathetic
NN50 (count)	Number of pairs of adjacent NN intervals differing by more than 50 ms in the entire recording.	Parasympathetic
PNN50 (%)	NN50 count divided by the total number of all NN intervals	Parasympathetic
Frequency Domain		
Total Power (ms²)	Variance of all NN intervals ≤0,4 Hz	Global variability
VLF (ms²)	Power in very low frequency range 0,003–0,04 Hz	Unclear
LF (ms²)	Power in low frequency range 0·04–0·15 Hz	Parasympathetic and Sympathetic
HF (ms²)	Power in high frequency range 0·15–0·4 Hz	Parasympathetic
LFnorm (n.u.)	LF power in normalised units LF/(Total Power–VLF)*100	Sympathetic
HFnorm (n.u.)	HF power in normalised units HF/(Total Power–VLF)*100	Parasympathetic
LF/HF	Ratio LF [ms2]/HF [ms2]	
Poincaré plot method		
SD1 (ms)	standard deviation of the instantaneous beat-to-beat variability	Parasympathetic
SD2 (ms)	Standard deviation of the continuous long-term variability	parasympathetic and Sympathetic
SD1/SD2	Ratio SD1 (ms)/SD2 (ms)	

3. Results

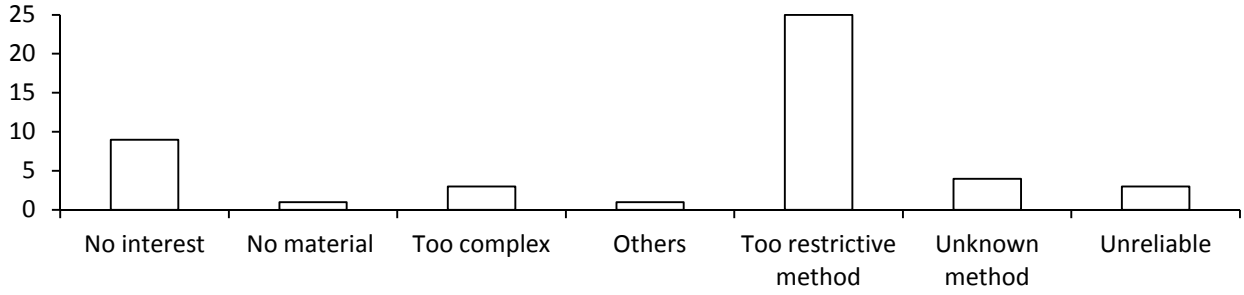
We obtained 72 responses from the 137 clubs targeted, a response rate of 53%. Within the clubs having responded, 50% (n=36) used HRR; of those with negative responses, 47% (n=17) stated they had no interest in this assessment. For HRV, 36% (n=26) were users; 54% of the negative responses (n=25) deemed this form of evaluation too restrictive. All responses to the question "why do you not use HRR and HRV?" are presented in Figure 3. Among the users of HRR and HRV, 32 and 24 clubs adapted their training loads according to the results and around half of HRR and HRV users give information and recommendations about sleep, diet or recovery techniques.

Figure 3 Distribution of causes explaining the non-use of the Heart Rate Recovery and Heart Rate Variability method

Panel A) Negative responses HRR questionnaire



Panel B) Negative responses HRV questionnaire



Distribution in bar charts of negative responses to the questionnaire panel A) HRR and panel B) HRV.

3.1. Reponses concerning the users of HRR

The diversity of the key elements of the procedure used made it possible to list 28 different procedures for 36 users. The majority of clubs used submaximal exercise (n=18) and/or football training (n=21). The duration of the exercise varied between 1 and over 30 minutes, but for the majority of procedures the duration of exercise was between 4 and 10 min (n=33). The majority of the measurements relate to the instantaneous value of HR (n=21) 1 min after the end of the exercise in the standing position (n=31). The frequency of determining the HRR was highly variable, but the majority of clubs measured it at least once a week (n=29).

3.2. Reponses concerning the users of HRV

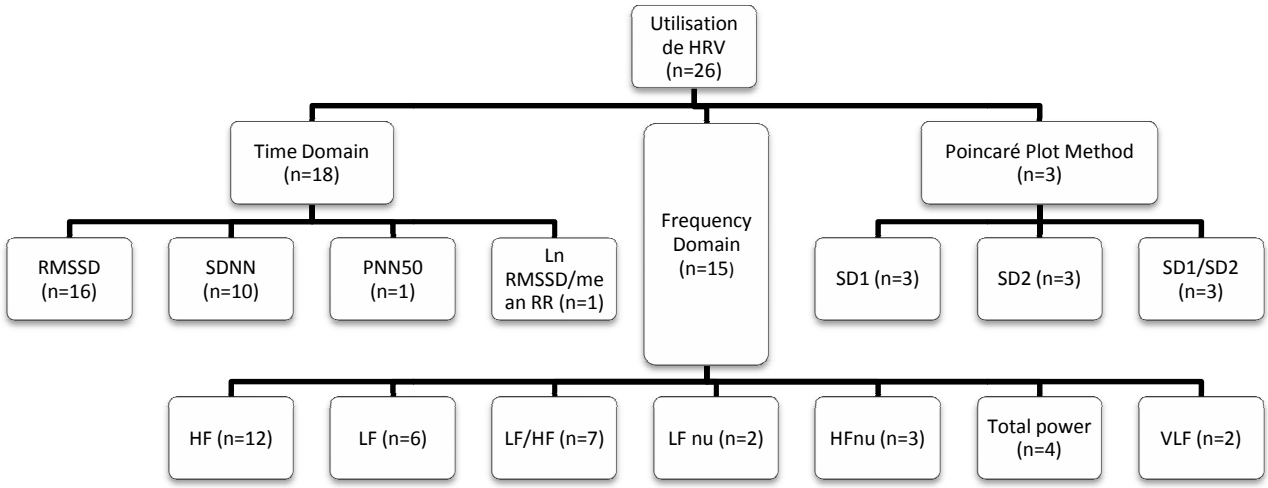
Three conditions of monitoring were listed: I) Morning on waking over a short duration (few minutes) (n=15) in a supine position (n=10), sitting (n=5), standing (n=1), or supine then standing (n=1); II) After standardised exercise over a short duration (n=8) in a standing position (n=6) or sitting (n=2); III) During the night over a long duration (few hours) (n=3). Apart from the night recordings, no club used the same procedure as others for measuring the HRV [duration of stabilisation of the HR before recording, position of recording, duration of recording, mathematical analyses, indicator(s) calculated].

For the time analysis, the parasympathetic indicator RMSSD (root mean square of successive differences (n=16) and the total variability indicator SDNN (standard deviation of NN interval) (n=10) were most used. For the spectral analysis, it was particularly the parasympathetic indicator HF (n=12) which was used. For the Poincaré plot analysis, the three indicators SD1, SD2 and the ratio SD1/SD2 were used identically (n=3). The use of the different indicators is presented in Figure 4.

Concerning the recordings in the morning on waking, the majority of procedures comprised one minute for stabilisation of the HR (n=8), then the recording of the HR is 4 or 5 minutes (n=10). For the recordings in the morning after standardised effort, the exercise lasted between 4 (n=2) and 10 minutes (n=1), but the majority used an exercise duration of 5 min (n=4), and the monitoring lasted 1 (n=3) to 5 min (n=1).

Lastly, most clubs took HRV measurements once a week (n=9) and twice a week (n=7). Only 2 clubs took measurements daily.

Figure 4 Distribution of mathematical methods used to analyse the Heart Rate Variability and their associated indicators



Distribution of mathematical analyses used for heart rate variability and their associated indicators. The total number of indicators calculated is higher than the number of clubs because some clubs use several indicators. RMSSD: Root Mean Square of Successive Differences of NN interval; SDNN: Standard Deviation of NN interval; PNN50: NN50 count divided by the total number of all NN intervals; Mean RR; Mean of NN intervals; SD1: Standard Deviation of the instantaneous beat to beat variability; SD2: Standard Deviation of the continuous long term variability; SD1/SD2: Ratio SD1/SD2; HF: High Frequency; LF: Low Frequency; VLF: Very Low Frequency; LF/HF: Ratio LF/HF; HFnu: High Frequency in normalized units; LFnu: Low Frequency in normalized units.

4. Discussion

The results of this study highlight the great diversity of the procedures used for both HRR and HRV in European football. Clubs use HRR more than HRV, but clubs that do not use HRR find this method of no interest, while HRV is commonly considered too restrictive for application. Concerning HRV, the parasympathetic indicators derived from the time domain (RMSSD) and frequency (HF) are the most used, together with the indicator of total variability of HRV (SDNN).

4.1. HRR and professional soccer

Half of the clubs that responded to the survey do not use HRR in monitoring players in training. Among these clubs, the majority deem that it is of no interest (Figure 1, panel A). This may reflect a lack of confidence in the accuracy and usefulness of this method. This is indeed what emerges from the recent published clinical data. Thorpe et al. (2016) monitored HRR after submaximal exercise in professional footballers for one week, from the day before the match to the fifth day after the match. No significant change to the HRR was observed over this period. Previously, still among professional footballers, Thorpe et al. (2015) showed that over a period of 17 days, including 2 official matches, no relationship was observed between HRR after submaximal exercise and the distance travelled at high intensity (≥14.4Km/h) over this period. Similarly, Buchheit, Voss, Nybo, Mohr, and Racinais (2013) showed that over one week of training among Australian footballers, HRR after submaximal exercise remained unchanged.

Among young footballers (aged 15 y), HRR after submaximal exercise is only moderately correlated (r=0.38) to the sprint repetition (10 repeated straight line 30m sprints separated by 30s of active recovery), without being correlated with the maximum aerobic speed test (Buchheit, Simpson, Al Haddad, Bourdon, & Mendez-Villanueva, 2012). Consequently, it appears that HRR after submaximal exercise is not a tool sensitive to the training load in football. Only Djaoui, Diaz-Cidoncha Garcia, Hautier and Dellal (2016) have shown that HRR was significantly different before and after a match. However, HRR was determined after a training session, without intensity being quantified, yet HRR clearly depends on the duration, the intensity and the type of training exercise (Dellal et al., 2015). Only standardised submaximal exercise makes it possible to accurately determine HRR (Borressen & Lambert, 2008). In our study, half of the clubs (n=19) that determine HRR do so after football training, exercise that by nature is not standardised in duration or intensity. Even if such a procedure is convenient and simple to implement for the players, it does not make it possible to compare any changes in the HRR over the ensuing days. Therefore, HRR after standardised submaximal effort (or after football training), in spite of its simplicity of implementation, does not seem to be a good indicator of the adaptation of players to the training load.

 CC BY NC ND

4.2. HRV and professional soccer

The procedure for measuring HRV by clubs is not consensual. Apart from night monitoring, which is in the minority (n=3), no club used the same procedure according to the time (morning on waking or after standardised exercise), position (sitting, supine, standing) and duration of recording, the time for stabilisation of the HR or the standardised submaximal exercise before recording, the mathematical analysis subsequently used and the indicators determined. Interestingly, some 20 years ago, the recommendations of the Task Force (1996) that are referenced here (cited more than 10,000 times) are clear in specifying methods in terms of period of stabilisation of the HR, position and duration of monitoring, and mathematical analyses and indicators to be determined. Notwithstanding, a diversity of measurement protocols are also found in the recent published clinical data (Naranjo, De la Cruz, Sarabia, De Hoyo, & Domínguez-Cobo, 2015; Ravé & Fortrat, 2016; Nakamura et al., 2016), making the comparison of results more difficult. For example, the posture of the recording has a direct impact on the activity of the ANS (Task force, 1996). The supine position favours the parasympathetic activity, while the sitting position, and moreso the standing position, favours the sympathetic branch (Perini et al., 1993; Sipinková, Hahn, Meyer, Tadlánek, & Hájek, 1997; Buchheit, Al Haddad, Laursen, & Ahmaidi, 2009). Monitoring after standardised submaximal exercise highlights the parasympathetic reactivity associated with the withdrawal of the sympathetic activity (Stanley, Peake, & Buchheit, 2013) and tests conducted in the morning at rest or at night give more information on the sympathovagal balance (Task Force, 1996).

In this study, the survey demonstrated that the clubs use HRV monitoring more in the morning on waking or after standardised submaximal exercise. Monitoring at night is less used by the professional clubs and is little studied in the professional footballer (only one investigation; Boullosa et al., 2013). The constraint for the players is certainly the reason for the lesser use of night monitoring. This constraint, regardless of the protocol, is also the main reason for non-use by the clubs (n=25). The establishment of regular monitoring for a group of 25 players over a season lasting 9 to 10 months can be tiresome for the players, even if this only requires a brief amount of time (~20 minutes).

 CC BY NC ND

The parasympathetic indicators RMSSD (time analysis) and HF (spectral analysis) are the most used by the clubs (n=28). The parasympathetic nervous system response is therefore most explored by the clubs. The published clinical data seem to indicate a greater interest in HRV rather than HRR. After submaximal exercise during the season among professional footballers, the RMSSD logarithm (LnRMSSD) did not vary significantly over the week (Thorpe et al., 2016) and was not well correlated (r=0.24) to the distance travelled at high intensity (≥14.4Km/h) (Thorpe et al., 2015). On the other hand, during a 2 week training camp of Australian professional footballers, the daily variations of Ln SD1 (parasympathetic indicators of the Poincaré plot analysis) were moderately (r=0.59) and strongly (r=0.78) correlated respectively with the daily variations in perceived training load and with performance variations in the YoYo IR2 test. However, they were not correlated to the variations in distance travelled at high intensity during the training activity (≥14.4Km/h) (Buchheit, Voss, Nybo, Mohr, & Racinais 2013). In the morning on waking, RMSSD, Ln RMSSD or Ln RMSSDweekly (average of Ln RMSSD values over one week) are relevant to a varying degree. During a period of preparation among professional footballers, RMSSD in a supine position does not vary significantly over 5 weeks of preparation (Ravé & Fortrat, 2016). Among professional futsal players, Ln RMSSDweekly in a sitting position is not correlated to the perceived training load during a period of preparation (Nakamura et al., 2016).In contrast, at a pre-season among high level footballers and high level futsal players, respectively, Ln RMSSDweekly and Ln RMSSD in a sitting position were strongly correlated to the perceived training load (r=0.85) (Flatt, Esco, & Nakamura, 2016) and significantly increased between the start and the end of a pre-season training period (Nakamura et al., 2016). Lastly, during a period of competition, RMSSD in a supine position was moderately (r=0.42) correlated to the perceived form of the professional footballers (Ravé, Kebsi, Zouhal, & Fortrat, 2016).

 CC BY NC ND

Recently, the time analysis, and notably RMSSD, its logarithmic transformation (Ln RMSSD) or its version averaged over a week (Ln RMSSDweekly), have been recommended to the benefit of the frequency analysis as it is easier to use, is less sensitive to breathing, intra-individual variations and to noise, and is more reproducible (Buchheit, 2014). Furthermore, RMSSD can be obtained after one minute of stabilisation and one minute of recording (Nakamura, Flatt, Pereira, Ramirez-Campillo, Loturco, & Esco, 2015), unlike the spectral HF indicator, which requires 5 minutes of stabilisation and 5 minutes of recording (Task Force, 1996). However, the time indicators do not make it possible to differentiate the sympathetic and parasympathetic indicators, unlike the frequency analysis (Schmitt, Regnard, & Millet, 2015). Furthermore, notably in the standing position, the spectral analysis is highly reproducible (Kowalewki, & Urban, 2004). Thus, in the supine position, the perception of form in professional footballers in competition is moderately correlated to the spectral indicators of the sympathetic activity (LF/HF and LFnu). Nevertheless, in the standing position, the frequency analysis does not make it possible to identify what branch of the ANS is correlated to the perception of the form, only that the total variability of HRV (total Power) is strongly correlated to the perception of form (r=0.553) (Ravé et al., 2016). In the same way, during a period of preparation in professional footballers, the frequency analysis does not make it possible to identify which branch of the ANS is correlated to the training load, only that the total variability of HRV (total Power) in the standing position is strongly correlated to the training load (p=0.0004) (Ravé & Fortrat, 2016).

4.3. The limits of HRV in soccer practice

The majority of studies in football are focused on the periods of preparation or during training camps (Ravé & Fortrat, 2016; Flatt et al., 2016). During these periods without competition, the training load is higher than during the season (Los Arcos, Martinez-Santos, Yanci, Mendiguchia, & Mendez-Villanueva, 2015). In competition periods (elite football team), Thorpe et al. (2015) have shown that Ln RMSSD did not change according to training load. During the competition period, an elite football team trains little, around 5 hours a week (Campos-Vazquez et al., 2015). The training load is certainly too low to disrupt the ANS (da Silva, de Oliveira, Silveira, Mello, & Deslandes 2016). Furthermore, football is not a continuous aerobic activity. It is characterised by a random succession of highly intense efforts followed by periods of recovery, also random. As such, football can be compared to the "fight or flight" response, which involves the sympathetic nervous system; examining these responses may be the most interesting to assess, yet here the most used indicators concerned the parasympathetic branch (HF and RMSSD). Monitoring during transfer to a standing position in a HRV test, and emphasising the sympathetic nervous system (Perini et al. 1993), seems therefore more suitable for football activity. Moreover, in previous studies we have shown that the recordings during a standing test were more sensitive to the training load and the perception of form than those undertaken in a supine position (Ravé & Fortrat, 2016).

Additionally, the training load is probably not the only element leading to a change to the ANS. Indeed, stress, sleep and quality of life have an impact on HRV (Gonçalves, Farinatti, Gurgel, & da Silva Soares, 2015). Furthermore, after a football match, players' sleep is usually impaired (Fullagar et al., 2016), especially after night matches.

 CC BY NC ND

Lastly, the factors determining the performance in football are not only linked to the cardiovascular system. The capacity to repeat sprints, accelerations/decelerations and changes of direction make considerable use of the neuromuscular system. Thus, the muscular endurance specific to football is also an important determinant of the performance (Stølen, Chamari, Castagna, & Wisløff). It is likely that the direct evaluation of the ANS by the HRV does not give information about the neuromuscular capacity of the players. It is likely for this reason that some studies highlight a link between HRV and training load, fatigue, and perception of form, respectively, but with correlation coefficients rarely greater than 0.7 (Ravé & Fortrat 2016, Thorpe et al., 2016). It is therefore possible that a procedure combining an evaluation of the HRV and the neuromuscular system would make it possible to further improve the load monitoring and adaptation of professional footballers.

4.4. Practical Applications

HRR is not widely used or a relevant tool in the load monitoring of elite football players

HRV, if used, should be evaluated in the morning on waking, in the supine and standing positions

The "Total power" of HRV standing seems most relevant

4.5. Future directions

Define the optimal procedure for measuring and recording HRV.

Define a procedure combining HRV and a neuromuscular evaluation.

Reduce the constraint for measuring HRV.

5. Conclusion

The use of HRR and HRV by European professional football clubs is not consensual. Furthermore, great diversity in the procedures used was evident. Although HRR does not seem appropriate to the context of football, it was the most used method. For HRV, recording in the morning on waking in a supine and standing position seems preferable, and makes it possible to monitor the adaptation of professional players to football practice. However, the absence of consensus emphasises the need to identify the best procedure to determine HRV, which should then be consistently applied. This method should also be made more practical for the clubs to use.

 CC BY NC ND

Acknowledgements

To all physical assistants in the various European clubs who were kind enough to respond to the questionnaires.

 BY NC ND

6. Bibliography

Abad, C., Kobal, R., Kitamura, K., Gil, S., Pereira, L., Loturco, I., & Nakamura, F. (2015)." Heart rate variability in elite sprinters: effects of gender and body position." *Clinical Physiology and Functional Imaging*, in press. doi: 10.1111/cpf.12331

Arcos, A.L., Martínez-Santos, R., Yanci, J., Mendiguchia, J., & Méndez-Villanueva, A. (2015). "Negative associations between perceived training load, volume and changes in physical fitness in professional soccer players."*Journal of Sports Science and Medicine*, 14 (2), 394-401.

Aubert, A.E., Seps, B., & Beckers, F. (2003). " Heart rate variability in athletes." *Sports Medicine*, 33 (12), 889-919. Review.

Borresen, J., & Lambert, M. I. (2008). "Autonomic control of heart rate during and after exercise: Measurements and implications for monitoring training status." *Sports Medicine*, 38(8), 633–646. doi:10.2165/00007256-200838080-00002

Boullosa, D., Abreu, L., Nakamura, F.Y., Muñoz, V.E., Domínguez, E., & Leicht, A.S. (2013)." Cardiac autonomic adaptations in elite Spanish soccer players during preseason."*International Journal of Sports Physiology and Performance,* 8 (4), 400-409.

Buchheit, M., Al Haddad, H., Laursen, P.B., & Ahmaidi, S. (2009)." Effect of body posture on postexercise parasympathetic reactivation in men." *Experimental Physiology,* 94 (7), 795-804. doi: 10.1113/expphysiol.2009.048041

Buchheit, M., Vos, S.C., Nybo, L., Mohr, M., & Racinais, S. (2011). "Physiological and performance adaptations to an in-season soccer camp in the heat: associations with heart rate and heart rate variability."*Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports,* 21 (6), e477-85. doi: 10.1111/j.1600-0838.2011.01378.x

Buchheit, M., Simpson, M.B., Al Haddad, H., Bourdon, P.C., & Mendez-Villanueva, A. (2012). "Monitoring changes in physical performance with heart rate measures in young soccer players." *European Journal of Applied Physiology,* 112 (2), 711-723. doi: 10.1007/s00421-011-2014-0

Buchheit, M. (2014). "Monitoring training status with HR measures: do all roads lead to Rome? "*Frontiers in Physiology*, (5), 73. doi: 10.3389/fphys.2014.00073

Campos-Vazquez, M., Mendez-Villanueva, A., Gonzalez-Jurado, JA., León-Prados, J.A., Santalla, A., & Suarez-Arrones, L. (2015). "Relationships between rating-of-perceived-exertion- and heart-rate-derived internal training load in professional soccer players: a comparison of on-field integrated training sessions." *International Journal of Sports Physiology and Performance,* 10 (5), 587-592. doi: 10.1123/ijspp.2014-0294.

da Silva, V.P., de Oliveira, N.A., Silveira, H., Mello, R.G., & Deslandes, A.C. (2015). "Heart rate variability indexes as a marker of chronic adaptation in athletes: a systematic review." *Annals of Noninvasive Electrocardiology,* 20 (2), 108-18. doi: 10.1111/anec.12237

Del Rosso, S.,, Nakamura, F.Y., & Boullosa, D.A. (2016) "Heart rate recovery after aerobic and anaerobic tests: is there an influence of anaerobic speed reserve?" *Journal of Sports Science,* 28, 1-8.

Dellal, A., Casamichana, D., Castellano, J., Haddad, M., Moalla, W., & Chamari, K. (2015)." Cardiac parasympathetic reactivation in elite soccer players during different types of traditional high-intensity training exercise modes and specific tests: interests and limits." *Asian Journal of Sports Medicine,* 6 (4), e25723. doi: 10.5812/asjsm.25723

Djaoui, L., Diaz-Cidoncha Garcia, J., Hautier, C., & Dellal, A. (2016). "Kinetic post-match fatigue in professional and youth soccer players during the competitive period." *Asian Journal of Sports Medicine,* 7, 7 (1), e28267. doi: 10.5812/asjsm.28267

Dong, J.G. (2016)." The role of heart rate variability in sports physiology."*Experimental and Therapeutic Medicine,* 11 (5), 1531-1536.

Flatt, A.A., Esco, M.R., & Nakamura, F.Y. (2016). "Individual heart rate variability responses to preseason training in high level female soccer players." *The Journal of Strength & Conditioning Research,* in press.

Fullagar, H.H., Skorski, S., Duffield, R., Julian, R., Bartlett, J., &Meyer, T. (2016). "Impaired sleep and recovery after night matches in elite football players." *Journal of Sports Science,* 34 (14), 1333-1339. doi: 10.1080/02640414.2015.1135249

Giles, D., Draper, N., & Neil, W. (2016). "Validity of the Polar V800 heart rate monitor to measure RR intervals at rest." *European Journal of Applied Physiology*, 116 (3),563-571. doi: 10.1007/s00421-015-3303-9

Gonçalves, T.R., Farinatti, P.T., Gurgel, J.L., & da Silva Soares, P.P. (2015). "Correlation between cardiac autonomic modulation in response to orthostatic stress and indicators of quality of life, physical capacity, and physical activity in healthy individuals." *The Journal of Strength & Conditioning Research,* 29, 1415–1421. doi:10.1519/JSC.0000000000000769

Halson, S. L. (2014). "Monitoring training load to understand fatigue in athletes." *Sports Medicine*, 44 (Suppl 2), 139–147. doi:10.1007/s40279-014-0253-z

Kowalewski, M.A., & Urban, M. (2004). "Short- and long-term reproducibility of autonomic measures in supine and standing positions." *Clinical Science (Lond)*, 106, 61–66.

Mohr, M., Draganidis, D., Chatzinikolaou, A., Barbero-Álvarez, J. C., Castagna, C., Douroudos, I., … Fatouros, I. G. (2016). "Muscle damage, inflammatory, immune and performance responses to three football games in 1 week in competitive male players." *European Journal of Applied Physiology,* 116 (1), 179-193. doi: 10.1007/s00421-015-3245-2

Mourot, L., Bouhaddi, M., Perrey, S., Rouillon, J.D., & Regnard, J. (2004). "Quantitative Poincaré plot analysis of heart rate variability: effect of endurance training." *European Journal of Applied Physiology"*, 91 (1), 79-87.

Nakamura, F.Y., Flatt, A.A., Pereira, L.A., Ramirez-Campillo, R., Loturco, I., & Esco, M.R. (2015). "Ultra-short-term heart rate variability is sensitive to training effects in team sports players."*Journal of Sports Science and Medicine*, 14 (3), 602-605.

Nakamura, F.Y., Pereira, L.A., Rabelo, F.N., Flatt, A.A., Esco, M.R., Bertollo, M., & Loturco, I. (2016). "Monitoring weekly heart rate variability in futsal players during the preseason: the importance of maintaining high vagal activity" *Journal of Sports Sciences,* 23, 1-7.

Naranjo, J., De la Cruz, B., Sarabia, E., De Hoyo, M., & Domínguez-Cobo, S. (2015). "Heart rate variability: a follow-up in elite soccer players throughout the season."*International Journal of Sports Medicine,* 36 (11), 881-886. doi: 10.1055/s-0035-1550047

Perini, R., Orizio, C., Milesi, S., Biancardi, L., Baselli, G., & Veicsteinas, A. (1993). "Body position affects the power spectrum of heart rate variability during dynamic exercise." *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology,* 66 (3), 207-213.

Plews, D.J., Laursen, P.B., Stanley, J., Kilding, A.E., & Buchheit, M. (2013). "Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: opening the door to effective monitoring." *Sports Medicine*, 43, 773-781. DOI: 10.1007/s40279-013-0071-8

Ravé, G., & Fortrat, J. (2016). "Heart rate variability in the standing position reflects training adaptation in professional soccer players." *European Journal of Applied Physiology,* 116 (8), 1575-1582. doi: 10.1007/s00421-016-3416-9

Ravé, G., Zouhal, H., Kebsi, W., & Fortrat, J.O. (2016). "The relationship between the perception of physical fitness and heart rate variability in professional soccer players." Personal Communication

Schmitt, L., Hellard, P., Millet, G.P., Roels, B., Richalet, J.P., & Fouillot, J.P. (2006). "Heart rate variability and performance at two different altitudes in well-trained swimmers." *International Journal of Sports Medicine*, 27, 226-231.

Schmitt, L., Regnard, J., Desmarets, M., Mauny, F., Mourot, L., Fouillot, J.P., ... Millet, G. (2013)." Fatigue shifts and scatters heart rate variability in elite endurance athletes." *PLoS One*, 12, 8 (8), e71588. doi: 10.1371/journal.pone.0071588

Schmitt, L., Regnard, J., & Millet, G. (2015)." Monitoring fatigue status with HRV measures in elite athletes: an avenue beyond RMSSD?" *Frontiers in Physiology,* 19, 6, 343. doi: 10.3389/fphys.2015.0034

Sipinková, I., Hahn, G., Meyer, M., Tadlánek, M., & Hájek, J. (1997). "Effect of respiration and posture on heart rate variability."*Physiological Research,* 46 (3), 173-179.

Stanley, J., Peake, J.M., & Buchheit, M. (2013). "Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: implications for training prescription."*Sports Medicine,* 43 (12), 1259-1277. doi: 10.1007/s40279-013-0083-4

Stølen, T., Chamari, K., Castagna, C., & Wisløff, U. (2005). "Physiology of soccer: an update", *Sports Medicine,* 35, (6), 501-536.

Thorpe, R.T., Strudwick, A.J., Buchheit, M., Atkinson, G., Drust, B., & Gregson W. (2015)." Monitoring fatigue during the in-season competitive phase in elite soccer players." *International Journal of Sports Physiology and Performance,* 10 (8), 958-964. doi: 10.1123/ijspp.2015-0004

Thorpe, R.T., Strudwick, A.J., Buchheit, M., Atkinson, G., Drust, B., & Gregson, W. (2016). "The tracking of morning fatigue status across in-season training weeks in elite soccer players." *International Journal of Sports Physiology and Performance,* in press.

Tulppo, M.P., Makikallio, T.H., Takala, T.E., Seppanen, T., & Huikuri, H.V. (1996). "Quantitative beat-to-beat analysis of heart rate dynamics during exercise."*American Journal of Physiology,* 271 (1 Pt 2), 244-252.

Vesterinen, V., Häkkinen, K., Laine, T., Hynynen, E., Mikkola, J., & Nummela, A. (2015). "Predictors of individual adaptation to high-volume or high-intensity endurance training in recreational endurance runners." *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, in press. DOI: 10.1111/sms.12530

Wehrwein, E.A., Orer, H.S., & Barman, S.M. (2016). "Overview of the Anatomy, Physiology, and Pharmacology of the Autonomic Nervous System." *Comprehensive Physiology,* 6 (3), 1239-1278. doi: 10.1002/cphy.c150037

Préambule à l'étude 2

Notre intérêt pour le suivi de l'adaptation à l'entrainement des footballeurs professionnel se situe en 2007. Les publications d'alors concernant le suivi longitudinal de la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) dans les sciences du sport se concentrent quasi exclusivement sur les sports d'endurance (course à pied, triathlon, ski de fond). Cette expérimentation présentée ici, dite préliminaire avait pour objectif de vérifier la faisabilité d'un suivi longitudinal de footballeurs professionnels à l'aide d'enregistrements de la fréquence cardiaque battement par battement réalisés au cours d'un test de lever actif. Ces enregistrements étaient destinés à l'analyse spectrale et notamment par la transformée rapide de Fourier.

Nous avons donc vérifié la compliance des joueurs à une telle procédure, ainsi que le respect des consignes afin d'obtenir des enregistrements de qualité suffisante pour une interprétation. Cependant l'objectif principal de cette étude était d'observer les éventuelles modifications des indicateurs spectraux de la VFC au cours de la saison qui comportait trois périodes au contenu d'entraînement différent. A savoir une période d'entraînement en football, une période de compétition et une période de trêve hivernale ou les joueurs devaient bénéficier d'un entraînement aérobie.

Les résultats obtenus lors de cette expérimentation sont la pierre angulaire de la suite de nos recherches. Alors que l'hypothèse de l'intérêt de la position debout n'était pas posée, c'est à notre surprise, dans cette position que l'analyse statistique s'est montrée significative suite à la période de trêve hivernale.

 CC BY NC ND

Etude 2

USE OF HEART RATE VARIABILITY ANALYSIS IN THE LONGITUDINAL FOLLOW UP OF PROFESSIONAL SOCCER PLAYERS

G. RAVE[1], B. BEAUNE[2], C. COUREAU[1] & S. DURAND[2].

[1]Stade Lavallois Mayenne FC, 34 place Henri Bisson 53000 Laval.
[2]Laboratoire "Motricité, Interactions, Performance" (EA 4334), Université du Maine, France

Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering
2010, 13(S1): 117-119

L'utilisation de l'analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque lors du suivi longitudinal des footballeurs professionnels

Résumé

But – Observer l'influence de la pratique du football de haut niveau sur la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) durant la saison régulière.

Méthode - Durant une période d'entraînement (début novembre : T1), une période de compétition (début décembre : T2) et après une période de trêve hivernale de 6 jours (début janvier : T3), la fréquence cardiaque a été enregistrée, battement par battement (Polar Team 2) en position couché puis debout chez huit joueurs de football professionnels. Nous avons analysé la VFC par analyse spectrale pour déterminer les Hautes Fréquences (HF) et les Basses Fréquences (LF) à la fois en position couché et debout.

Résultats – Nous observons une augmentation significative de HF ($p=0.0067$) en position debout à T3 comparativement à T1 et T2. Aucune autre modification de HF et de LF n'est observée. Différents profils de VFC sont observés dans chacune des positions à T1, T2 et T3 pour HF et LF.

Conclusion – L'évaluation de la VFC d'une équipe professionnelle de football doit probablement prendre en compte un grand nombre de facteurs, comme l'âge, la position du joueur et le type d'entraînement. Des études complémentaires doivent être réalisées pour étudier l'impact de la pratique du football sur la VFC et sur le système nerveux autonome.

Mots-clés *Analyse spectrale, cardiofréquencemètre, sport intermittent*

Use of heart rate variability in the longitudinal follow up of professional soccer players

Abstract

Purpose – To observe the influence of high-level soccer practice on heart rate variability (HRV) during a regular soccer season

Methods – During a training period (beginning of November : T1), a competition period (beginning of December: T2) and after a 6 days winter break period (mid January: T3), heart rate was recorded, beat to beat (Polar Team 2) in supine and standing position on 8 professional soccer players. We analyzed HRV by means of spectral analysis to determine HF (High frequencies) and LF (low Frequencies) indicators in both supine and standing position.

Results – We observed a significant increase of HF in standing position at T3 when compared with T1 and T2. We observed no other changes. We observed several patterns of HRV at T1, T2 and T3 for HF and LF in both the position.

Conclusions – Assessment of HRV in a professional soccer team must likely take into account numerous factors such as age, type and quality of training and position. Complementary studies have to be performed to study the impact of soccer practice on HRV and on autonomic nervous system.

Keywords *intermittent sport, mobile heart rate monitor, spectral analysis*

1. Introduction

In professional soccer, a regular season is in mean 9 months long and imposes on the athletes a great number of training sessions and games played. The practice of soccer is very stressful for a player's body because of the distances run per game (between 8 and 12 km/game), eccentric strains related to changes in direction during the match, intensity of the match and beatings. Consequently, the player's body has to adapt regularly, both at the central and the peripheral level (Dellal 2008). Analysis of heart rate variability (HRV), as proven in previous studies (Pagani and Lucini 1999; Mourot et al. 2004), could be useful for the longitudinal follow-up of training in order to prevent fatigue. The goal of this preliminary work is to observe the possible influence of high-level soccer practice on HRV during the first part of a regular soccer season.

1.1. Methods

1.2. Subjects

Eight professional soccer players (French Ligue 2, Table 1) participated in this study. All gave written consent after presentation of the study. Measures have been performed between the beginning of November and the middle of January during a physical training session. Players's average anthropometric characteristics are as follows: age: 26.6 ± 5.5 years, height: 178.4 ± 3.4 cm, body mass: 74.1 ± 5.5 kg, fat mass percentage: 15.4 ± 2.2.

Table 1 Age and position of the participant

Players no.	Age (years	Position
1	27	Defender
2	21	Midfielder
3	28	Midfielder
4	35	Forward
5	32	Midfielder
6	20	Midfielder
7	21	Forward
8	29	Forward

 CC BY NC ND

1.3. Test

Heart rate was measured continuously, for each cycle, with the soccer players in two different positions: first in the supine position for 8 min and in the standing position for 7 min. The subjects were asked not to move and no respiratory frequency was imposed. The subjects were installed in a still place with no external noise. Measures were performed at 9.30 am using a polar team system 2w at three characteristic periods of the professional soccer season: during training (T1), a competition phase (T2) and a training session after a 6-day break (winter break, T3). In the two days preceding the test, subjects were asked to restrain from any intense physical activity. HRV was assessed using the Nevrokard software (aHRV version 11.0.4: Nevrokard Kiauta, Slovenia) and classical procedure (Eckberg 2000). We calculated spectral power (in ms2) in the high frequency (HF: 0.15–0.40 Hz) and low frequency (LF: 0.04–0.15 Hz) of the recorded signal via the fast Fourier Transform algorithm.

1.4. Statisical Analysis

Values are presented as mean standard deviation. An ANOVA (repeated measurements) test procedure was applied to evaluate time–effect, position–effect and time–position interactions (STATVIEW 5.1 software; Statistical Analysis System, Gary, NC, USA). Statistical significance (set at p , 0.05) was estimated using Scheffe's post-hoc test.

 CC BY NC ND

2. Results and Discussion

The different HF and LF spectral power values are presented in Table 2 for the supine position and in Table 3 for the standing position. HF is a marker of vagal efferent activity, while LF is an index of sympathetic modulation (Lombardi et al. 1996). The aim of the study was to observe possible changes in the HF and LF between the supine and the standing position at different periods in the first part of the professional soccer season. Statistical analysis showed a significant difference only for the HF with the subjects in the standing position, with HF significantly higher at T3 when compared with T1 and T2 (P ¼ 0.0067). During the winter break, soccer players had to follow a light aerobic training program. This could explain the observed increase in HF since it has been shown that a moderate aerobic training leads to an increase in vagal tone (Aubert et al. 2003). However, a previous study reported that this kind of training also leads to an increase in HF spectral power for the supine position (Raczak et al. 2006). We did not observe any increase in HF for the supine position. The reason for this discrepancy is unclear. Different patterns can be observed in the profile of HRV at T1, T2 and T3 for HF and LF in both the positions (Tables 1 and 2). In a group of professional soccer players, different profiles coexist (e.g. midfielder VS defender). Consequently, the game duration, the kind of training and the energy expenditure largely vary (Dellal 2008). However, few are known for the impact on the autonomic nervous system (ANS) balance. Furthermore, Laitinen et al. confirmed that age could blunt HRV profile (Laitinen et al. 2004). Considering the ages of the players (20–35 years old), the impact of age factor on our observations must not be neglected.

Table 2 LF and HF spectral power values (ms²) at T1, T2 and T3 in the supine position

	LF spectral power (ms²)			HF spectral power (ms²)		
Supine Player no.	T1	T2	T3	T1	T2	T3
1	85.90	1340.85	945.45	195.35	981.17	1142.11
2	2683.54	4794.97	6448.22	3079.00	3877.25	5059.05
3	66.2	582.63	3423.20	4826.05	3140.41	108983.80
4	1393.57	2139.11	946.85	998.48	1697.18	502.42
5	941.96	2418.39	823.63	2367.38	2517.43	1126.16
6	1136.28	1322.09	1263.63	6415.86	1865.28	5050.14
7	4702.23	3642.53	7296.76	4010.91	2746.07	6398.21
8	1174.58	2944.84	521.20	542.41	667.06	279.99

 CC BY NC ND

Table 3 LF and HF spectral power values (ms²) at T1, T2 and T3 in the standing position

	LF spectral power (ms²)			HF spectral power (ms²)		
Supine Player no.	T1	T2	T3	T1	T2	T3
1	483.52	276.55	1792.17	45.39	17.54	118.90
2	2714.52	6952.11	5146.19	534.07	690.71	2177.77
3	2151.77	2840.76	7080.19	801.79	649.93	2402.18
4	1182.79	714.19	181.00	50.87	114.06	55.57
5	828.00	9822.77	2596.72	351.27	1035.26	2041.84
6	303.24	205.74	521.75	129.88	43.83	248.83
7	3295.21	4179.84	3758.69	121.43	222.92	451.94
8	748.02	3329.37	3295.02	388.84	213.21	896.90

3. Conclusion

Assessment of HRV in a professional soccer team must likely take into account numerous factors such as age, type and quality of training and position. Complementary studies have to be performed to study the impact of competition and training on HRV and ANS balance in relation to the different profiles of players found in a professional soccer team.

4. References

Aubert AE, Seps B, Beckers F. 2003. Heart rate variability in athletes. Sport Med. 33(12):889–919.

Dellal A. 2008. De l'entraıˆnement a` la performance en footbal. Sciences et pratique du sport, De Boeck.

Eckberg DL. 2000. Physiological basis for human autonomic rhythms. Ann Med. 32(5):341–349.

Laitinen T, Niskanen L, Geelen G, Lansimies E, Hartikainen J. 2004. Age depency of cardiovascular autonomic responses to head up tilt in healthy subjects. J Appl Physiol. 96(6):2333–2340.

Lombardi F, Malliani A, Pagani M, Cerutti S. 1996. Heart rate variability and its sympatho–vagal modulation. Cardiovasc Res. 32:208–216.

Mourot L, Bouhaddi M, Perrey S, Cappelle S, Henriet MT, Wolf JP, Rouillon JD, Regnard J. 2004. Decrease in heart rate variability with overtraining: assessment by the Poincare´ plot analysis. Clin Physiol Funct Imaging. 24(1):10–18.

Pagani M, Lucini D. 1999. Chronic fatigue syndrome: a hypothesis focusing on the autonomic nervous system. Clin Sci (Lond). 96(1):117–125.

Raczak G, Daniłowicz-Szymanowicz L, Kobuszewska-Chwirot M, Ratkowski W, Figura-Chmielewska M, Szwoch M. 2006. Long-term exercise training improves autonomic nervous system profile in professional runners. Kardiol Pol. 64(2):135–140; discussion 141–142.

Préambule à l'étude 3

L'étude 2 a mis en avant l'intérêt de la position debout lors du suivi longitudinal du footballeur professionnel. Cependant, ce travail souffre d'un bon nombre de limites, parmi lesquelles l'intervalle de temps important entre les mesures (4 semaines) et la non quantification de la charge d'entraînement.

Nous avons donc souhaité assurer le suivi longitudinal de la VFC à l'aide des indicateurs fréquentiels ainsi que de l'indicateur temporel RMSSD, au cours d'une pré-saison chez des footballeurs professionnels. La pré-saison se prêtait bien à notre expérimentation. Effectivement, au cours d'une pré-saison de 5 à 6 semaines, on observe généralement 3 blocs de travail avec des objectifs différents (reprise, intensité, affûtage). Cette pré-saison nous permet donc d'obtenir trois niveaux différents de charge de travail. De plus, l'intervalle entre les mesures est réduit à maximum 10 jours. Ainsi nous pouvions nous attendre à ce que la VFC varie au fil du temps tout en limitant les interférences avec les facteurs confondants extérieurs à la charge d'entraînement. Finalement, durant cette période de pré-saison, l'absence de compétition favorise l'adhésion des joueurs.

Enfin, cette étude nous permet de poser notre hypothèse qui sera le fil conducteur des deux études suivantes. Le football est une activité intermittente pouvant être assimilée à la réponse « fight or flight ». Celle-ci met en jeu le système nerveux sympathique. L'adaptation cardiovasculaire à la position debout met elle aussi en jeu ce système nerveux sympathique. Nous émettons donc l'hypothèse que les indicateurs sympathiques de la VFC lors d'une épreuve de lever actif constituent un élément objectif de suivi de l'adaptation à l'entrainement dans les sports intermittents.

 CC BY NC ND

Etude 3

HEART RATE VARIABILITY IN THE STANDING POSITION REFLECTS TRAINING ADAPTATION IN PROFESSIONAL SOCCER PLAYERS

G. RAVÉ[1] & J.O. FORTRAT[2]

[1] Stade Lavallois MFC, plaine des Gandonnière, rue Georges Coupeau, 53000 Laval

[2] Centre Hospitalier Universitaire (University Hospital Centre), Explorations Fonctionnelles Vasculaires, UMR, CNRS 6214, Inserm 1083, 49933 Angers, France

European Journal of Applied Physiology.

2016; 116(8):1575-1582. doi: 10.1007/s00421-016-3416-9.

La variabilité de la fréquence cardiaque en position debout reflète l'adaptation à l'entraînement des joueurs de football professionnels

Résumé

But - Montrer que la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) en position debout reflète davantage l'adaptation à l'entraînement des athlètes dans les sports dits intermittents que l'indicateur du tonus parasympathique au repos habituellement utilisé dans les sports d'endurance.

Méthode - Vingt joueurs de football professionnels (sport intermittent) ont pris part à un entraînement de 5 semaines divisé en trois périodes successives: "mise en route", "entraînement intensif" et "affûtage". Au début et à la fin de chacune des trois périodes, un stand test a été effectué et la fréquence cardiaque a été enregistrée, battement par battement (Polar Team 2). Nous avons analysé la VFC pour déterminer l'indicateur le plus utilisé pour démontrer l'adaptation à l'entraînement dans les sports d'endurance (lnRMSSD couché, logarithme de la racine carrée de la moyenne des différences au carré des intervalles RR successifs) ainsi que des indicateurs obtenus par analyse spectrale à la fois en position couché et debout.

Résultats - En position couché, une diminution de la fréquence cardiaque a été observée au cours de l'entraînement (-5,2 ± 1,3 bpm), tandis que lnRMSSD et les indicateurs issus de l'analyse spectrale sont restés inchangés. En position debout, la "mise en route" a provoqué une augmentation de la puissance totale issue de l'analyse spectrale qui est amplifiée lors de la période "affûtage" (3,39 ± 0,09, 3,61 ± 0,08 et 3,65 ± 0,09 log MS2, respectivement). Cependant, les changements du système nerveux autonome sont probablement plus complexes qu'un changement de l'activité ou de la balance autonome puisque les indicateurs spectraux autonomes sont restés inchangés.

Conclusion – La VFC en position debout permet de suivre l'adaptation à l'entraînement dans un sport intermittent contrairement à l'indicateur habituellement utilisé dans les sports d'endurance. Toutefois, l'importance des modifications de la VFC en position debout au cours d'une période d'entraînement demeure peu claire.

Mots-clés *Système nerveux autonome, variabilité de la fréquence cardiaque, football*

Heart rate variability in the standing position reflects training adaptation in professional soccer players

Abstract

Purpose - To show that heart rate variability (HRV) in the standing position better reflects the way in which athletes adapt to training in so-called intermittent sports than the indicator of resting parasympathetic tone usually employed in endurance sports.

Methods - Twenty professional soccer players (intermittent sport) took part in a 5-week training session divided into three successive periods: "Warm-up", "Intensive training" and "Tapering". At the beginning and end of each of the three periods, a stand test was carried out and the heart rate was recorded, beat by beat (Polar Team 2). We analysed HRV to determine the indicator mostly used to demonstrate training adaptation in endurance sports (lnRMSSD supine, natural logarithm of root mean square of the successive differences) as well as indicators obtained by means of spectral analysis in both supine and standing position.

Results - A decrease in heart rate was observed in the supine position at rest during training (−5.2 ± 1.3 bpm) while lnRMSSD and spectral analysis indicators remained unchanged. The "Warm-up" caused an increase in spectral analysis total power in standing position which was further highlighted by "Tapering" (3.39 ± 0.09, 3.61 ± 0.08 and 3.65 ± 0.09 log ms2, respectively). However, the autonomic changes are probably more complex than a change in autonomic activity or balance since spectral analysis autonomic indicators remained unchanged.

Conclusions - HRV in the standing position could monitor training adaptation in intermittent sports contrary to the indicator usually employed in endurance sports. However, the significance of the HRV change in the standing position during training remains unclear.

Keywords *Autonomic nervous system · Heart rate variability · Soccer*

Abbreviations

ANOVA	Analysis of variance
Bpm	beats per minute
D0 to D35	Day 0 to Day 35 of training period
GPS	Global Positioning System
HF	High Frequencies of Heart Rate Variability
HFnu	High Frequencies in normalised units
HR	Heart Rate
HRV	Heart Rate Variability
LF	Low Frequencies of Heart Rate Variability
LFnu	Low Frequencies in normalised units
LF/HF	Low Frequencies / High frequencies ratio
lnRMSSD	Natural Logarithm of Root Mean Square of the Successive Differences
log	Indicates the logarithm transformation of the associated variable
n.u	Normalied Units
RMSSD	Root Mean Square of the Successive Differences
SEM	Standard Deviation to the Mean
T	Total power
T0 to T3	Stand Test before the first training period and at the end of each
VLF	Very Low Frequencies in normalised units
W1 to W5	Week 1 to Week 5 of training

1. Introduction

Before every competition, athletes must undergo a training period, which varies in length according to the discipline. It must allow them to reach a high level of performance for the forthcoming competition and, in some disciplines, for the entire competitive season. A complex juggling act is therefore, required to develop physical qualities and yet minimise fatigue due to the training load. To do this, trainers use several tools in an attempt to establish how athletes adapt to the training load. Amongst these, questionnaires, laboratory tests, neuromuscular tests and tracking (global positioning system, GPS) are mostly used by trainers (for a review of these tools, see Halson 2014). Some use heart rate variability (HRV) (Naranjo Orellana et al. 2015).

This method indirectly reflects the autonomous nervous system (Task Force 1996). It can be used in two ways by analyzing time on the one hand and frequency on the other (Task force 1996). Time analyses carried out when supine and resting are preferred in the training context as they appear to be less dependent on the respiratory cycle, less sensitive to signal noise and less complex to implement (Buchheit 2014). They have proved invaluable in endurance sports in which the main energy resources involve the aerobic pathways (especially the root mean square of the successive differences, RMSSD, and its logarithmic transformation, lnRMSSD to normalise distribution, Buchheit 2014). In fact, they reflect the parasympathetic branch of the autonomic nervous system. They can thus effectively direct the training load (Kiviniemi et al. 2007; Vesterinen et al. 2013), reflect a state of fatigue (Plews et al. 2013), a state of overtraining (Le Meur et al. 2013) and are also correlated to performance (Atlaoui et al. 2007).

Many sporting disciplines, especially intermittent sports (e.g., soccer, basket-ball), are characterised by random alternations between resting/active cycles requiring both aerobic and anaerobic pathways. Furthermore, the physical and tactical constraints of these sports lend themselves to the fight or flight response which involves a reaction by the sympathetic branch of the autonomic nervous system (Jansen et al. 1995). In theory, it therefore, seems interesting to assess the sympathetic branch during an activation test (Olufsen et al. 2008).

 CC BY NC ND

The stand test is a conventional activation test used to investigate the autonomic nervous system (Task Force 1996). Accurate quantification of sympathetic nervous activity is difficult and would not be practicable for in-field experiments. However, the low frequency domain (LF) of HRV spectral analysis is influenced by the sympathetic nervous system in addition to the influences of the parasympathetic nervous system and baroreflex (Task Force 1996; Rahman et al. 2011; Moak et al. 2009). Therefore, a change in sympathetic nervous system should lead to a change in LF. LF has not been studied very much in the training context since it is well known that it cannot reliably assesses the sympathetic nervous system when heart rate is high like during physical activity (Perini and Veicsteinas 2003, Pichon et al. 2004). However, LF (or its logarithmic transformation logLF) has been largely studied in the context of slight activation (associated with a slight increase in heart rate) as is seen during the stand test (Task force 1996). Moreover, Schmitt et al. (2013, 2015) showed that LF or logLF in the standing position provides additional information to HRV in the supine position in endurance sports and is involved in reflecting the state of fatigue in Nordic skiers (Schmitt et al. 2013, 2015) and in runners (Portier et al. 2001). Lastly, we recently showed that it correlates to the perception of form in professional soccer players in the intermittent sport context (personal communication).

We hypothesized that the low frequency domain of HRV spectral analysis during a stand test reflects the way in which professional soccer players adapt to the training load.

2. Methods

This study was carried out during preparations for the 2014–2015 competition season. Twenty professional soccer players in the French Second Division took part in this experiment. Informed consent was obtained from all individual participants included in the study. The procedures were approved by the ethic committee of Angers (France). The anthropometric and physical characteristics were as follows: age 24.9 ± 1.5 years (mean ± SEM), height 1.77 ± 0.03 m, weight 75.0 ± 1.3 kg.

 CC BY NC ND

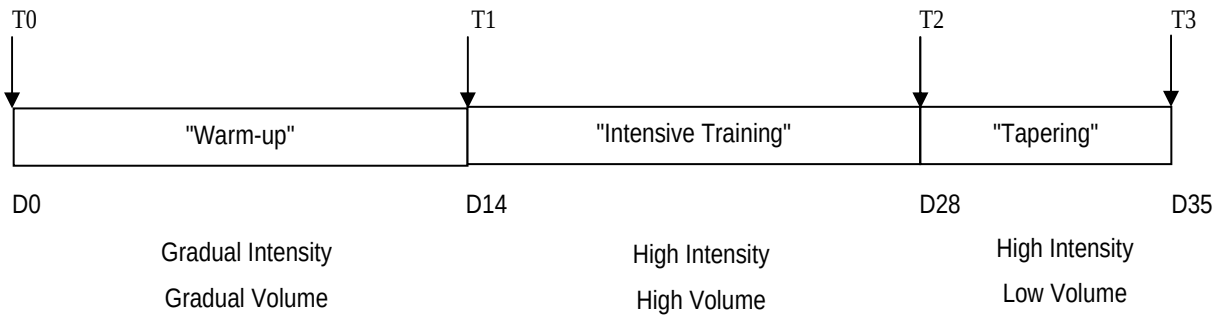
2.1. Experimental design

The training programme was defined by the team's technical staff and was not changed in any way by the investigators. Preparation for the season was carried out over 5 weeks. This was divided into three periods. The first so-called "Warm-up" period lasted 14 days. The second so-called "Intensive training" period also lasted 14 days. Finally, the third period, "Tapering", lasted 8 days (Fig. 1).

Four stand tests were carried out during this preparatory phase. The first test was carried out prior to preparation (T0). This was followed by a test at the end of each of the three periods (T1, T2 and T3). Thus T1 was carried out at the end of the "Warm-up" period (D14), T2 at the end of the "Intensive training" period (D28) and T3 at the end of the "Tapering" period (D35).

Each stand test was carried out in the morning (08:30) on an empty stomach. A stand test comprised one 10-min phase in the supine position followed by a 7-min standing phase. The soccer players did not have to move or speak throughout the stand test. Every player was fitted with a heart rate monitor (Polar Team 2) to register the RR-interval (the interval between two heart beats, i.e., the opposite to cardiac frequency) beat by beat with a 1 ms resolution.

Figure 1 Experimental design according to player agenda during training period.



5-week training time schedule comprising three successive periods: "Warm-up" (D0 to D14), "Intensive Training" (D15 to D28) and "Tapering" (D29 to D35). The aim of the "Warm-up" period is to develop aerobic capacity and football-specific training. The "Intensive Training" period comprises four friendly matches and training in football techniques. The "Tapering" period comprises only one friendly match and training in football techniques. Stand tests are indicated (T0 to T3).

2.2. Analysis of heart rate variability (HRV)

We carried out HRV time and frequency analyses to estimate the activity of the autonomic nervous system using Nevrokard software (aHRV version 11.0.4, Nevrokard Kiauta, Slovenia). We determined the spectral power density by means of spectral analysis of 512 RR-interval values after re-sampling at 2 Hz from the fifth minute of the 10-min phase in the supine position. Breathing rate was not controlled nor recorded and we did not record blood pressure during this in-field experiment. The filtering of artefacts and ectopic beats was performed manually in advance (aHRV software).

The time domain analysis involved determining the RMSSD (parasympathetic indicator) and its related natural logarithm (lnRMSSD). As recommend by Task Force (1996), the frequency domain analysis involved obtaining the harmonic component spectrum of very low (VLF ≤0.04 Hz), Low (0.04 Hz ≤ LF ≤ 0.15 Hz) and High (0.15 Hz ≤ HF ≤ 0.40 Hz) Frequencies to establish the related spectral power (ms2/Hz) as well as total power (or overall HRV, T ≤ 0.4 Hz), normalised LF and HF power (LFnu and HFnu, respectively, no unit), and LF/HF ratio. Finally, the logarithm of related VLF, LF, HF, T, LFnu, HFnu and LF/HF was calculated (logVLF, logLF, logHF, logT, logLFnu, logHFnu, logLF/HF, respectively).

According to the Task Force (1996), HF are under the parasympathetic influences while LF are under the influence of both parasympathetic and sympathetic nervous system. However, LF changes tracks sympathetic changes during a stand test. HF and LF could be normalised according to total power (T) to avoid the confounding effects of overall HRV and HR changes. Normalised HF and LF are indicators of parasympathetic and sympathetic influences, respectively (HFnu and LFnu). LF/HF ratio is an indicator of the autonomic balance between sympathetic and parasympathetic system. The meaning of VLF has remained unclear. These VLF could not be correctly assessed on short term recordings but it is recommended to mention them in any study that used spectral analysis even in short term (Task Force 1996). In the standing position, the same procedure was carried out on 512 consecutive RR-interval values resampled at 2 Hz as when lying down. The first 2 min of this phase used to adapt to the new position and stabilise the heart rate were routinely eliminated.

In addition, and to have an objective view of the physical activity of the players over the 5-week training period, five players (a striker, a wide midfielder, a defensive midfielder, a full-back and a central defender) were fitted with a GPS system (SPI Proc X, 5 Hz, GPSport, Canberra, Australia) to quantify the distances covered at different speeds, for the duration of each training session.

2.3. Statistical analysis

Data are presented as mean ± SEM. We performed a between-period comparison by means of analysis of variance (ANOVA) for repeated measurements after a Bartlett's test for equality of variances. When appropriate, a post hoc t test for paired data with Bonferroni correction was applied (Prism 5.01, GraphPad Software, San Diego, CA, USA). We set statistical significance at $p \leq 0.01$ because of the large number of comparisons.

3. Results

All of the data in the supine and standing positions are shown in Table 1. Heart rate (HR) at rest in the supine and standing positions fell highly significant in the tests carried out during and after the preparatory phase (T1, T2 and T3), compared to the control test before preparation started (T0) with no further changes (T1 vs. T2 vs. T3), Table 1.

Table 1 Numerical values of Heart rate and Heart Rate Variability in the supine and the standing position

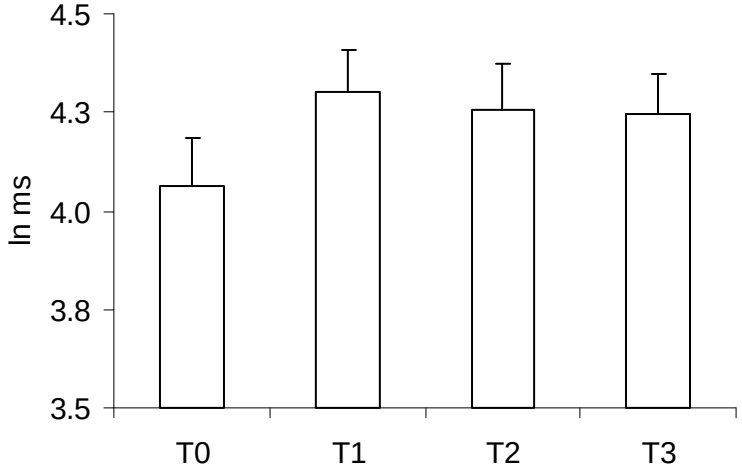
Indicator	T0	T1	T2	T3
Supine				
HR (bpm) <0.0001	53.8 ± 1.9	48.7 ± 1.4***	48.3 ± 1.3***	48.5 ± 1.9***
lnRMSSD 0.0147	4.07 ± 0.12	4.30 ± 0.10	4.26 ± 0.11	4.25 ± 0.10
logT (ms²) 0.0098	3.32 ± 0.08	3.48 ± 0.06	3.48 ± 0.09	3.46 ± 0.08
logVLF (ms²) 0.0084	2.71 ± 0.09	2.95 ± 0.06	2.97 ± 0.11	2.93 ± 0.10
logLF (ms²) 0.1253	2.97 ± 0.09	3.02 ± 0.07	3.02 ± 0.10	2.98 ± 0.09
logLFnu (n.u) 0.8462	1.71 ± 0.03	1.71 ± 0.03	1.73 ± 0.03	1.69 ± 0.03
logHF (ms²) 0.0757	2.79 ± 0.08	2.95 ± 0.08	2.93 ± 0.10	2.93 ± 0.09
logHFnu (n.u) 0.9907	1.63 ± 0.04	1.64 ± 0.04	1.64 ± 0.03	1.65 ± 0.04
logLF/HF 0.9494	0.08 ± 0.07	0.07 ± 0.07	0.09 ± 0.05	0.05 ± 0.08
Standing				
HR in (bpm) <0.0001	77.7 ± 3.0	65.5 ± 2.0***	64.4 ± 1.7***	65 ± 2.4***
logT (ms²) 0.0004	3.39 ± 0.09	3.61 ± 0.08**	3.56 ± 0.08	3.65 ± 0.09***
logVLF (ms²) 0.0025	3.01 ± 0.10	3.28 ± 0.09**	3.23 ± 0.09	3.26 ± 0.09
logLF (ms²) 0.0013	3.04 ± 0.11	3.22 ± 0.08	3.17 ± 0.09	3.31 ± 0.09***
logLFnu (n.u) 0.9208	1.92 ± 0.03	1.92 ± 0.01	1.91 ± 0.01	1.92 ± 0.02
logHF (ms²) 0.0003	2.15 ± 0.13	2.46 ± 0.10**	2.45 ± 0.10**	2.51 ± 0.14***
logHFnu (n.u) 0.0329	1.03 ± 0.07	1.16 ± 0.05	1.19 ± 0.05	1.09 ± 0.08
logLF/HF 0.1008	0.89 ± 0.09	0.76 ± 0.06	0.72 ± 0.07	0.82 ± 0.09

T0, T1, T2 and T3 correspond to the initial evaluation and these at the end of the three training phases ("Warm-up", "Intensive training" and "Tapering", respectively) over a period of 5 weeks. HR heart rate, lnRMSSD natural logarithm of root mean square of the successive differences, logT logarithm of total power, logVLF logarithm of very low frequencies, logLF logarithm of low frequencies, logLFnu logarithm of very low frequencies in normalised units, logHF logarithm of high frequencies, logHFnu logarithm of high frequencies in normalised units, logLF/HF logarithm of Low frequencies/High frequencies ratio. ANOVA p values are mentioned below each indicator name in the second column. *** with $p < 0.001$ vs. T0, ** with $p < 0.01$ vs. T0, no further differences (T1 vs. T2 vs. T3) have been observed.

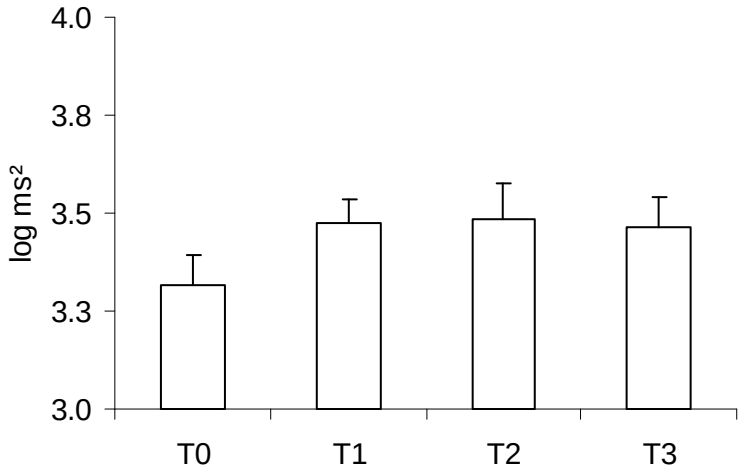
We did not observe any significant difference in the indicator, mostly used to demonstrate training adaptation in endurance sports (lnRMSSD in the supine position) as well as in spectral analysis in the supine position (Fig. 2 , differences in LnRMSSD and in logT were almost significant). We observed significant differences only in spectral analysis in the standing position. logLF increased at T3 but this change came with increase in both logT and logHF. We observed an increase of logT, log- VLF, and logHF at T1 while only logHF is altered at T2 (Table 1). However, all these changes reflected the change in logT (Fig. 2) since we did not observe any difference in normalised units (logLFnu and logHFnu) nor in LF/HF (Table 1).

Figure 2 Heart Rate Variability during five weeks of training by professional soccer players.

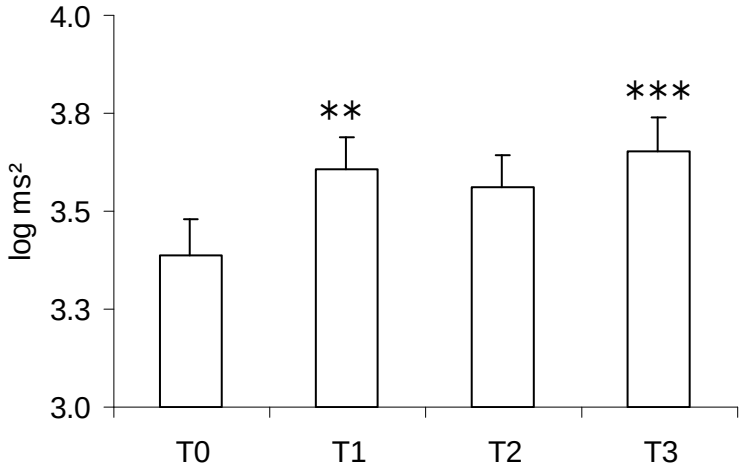
a lnRMSSD supine



b Total Power supine



c Total power standing



a Logarithmic transformation of the root mean square of the successive differences (lnRMSSD) supine, **b** Logarithmic transformation of the total power of heart rate Variability spectral analysis in supine position, and **c** the same in standing position. T0, T1, T2 and T3 correspond to the initial evaluation and these at the end of the three training phases ("Warm-up", "Intensive training" and "Tapering", respectively) over 5 weeks of training. lnRMSSD natural logarithm of root mean square of the successive differences; **with $p < 0.01$ vs. T0, ***with $p < 0.001$ vs. T0, no further differences (T1 vs. T2 vs. T3) have been observed

The distances covered at various speeds by the five subjects are presented in Table 2. The distances covered increased gradually between weeks 1 and 2, for all speeds. During weeks 3 and 4 ("Intensive training" period), the greatest distances were covered for speeds exceeding 16 km/h. Finally, during week 5 ("Tapering" period), there was a real decrease in the volume of work for speeds exceeding 16 km/h compared to weeks 3 and 4.

Table 2 Distances covered during the training

T0 ↓		T1 ↓		T2 ↓	T3 ↓
	"Warm up"		"Intensive Training"		"Tapering"
Speed category	W1	W2	W3	W4	W5
< 12	31827 ± 1978	37656 ± 2990	27081 ± 612	22864 ± 544	24423 ± 577
12 to 15.9	4826 ± 473	9063 ± 1819	7640 ± 546	5424 ± 1271	5350 ± 357
16 to 19.9	814 ± 112	2415 ± 602	3412 ± 316	2845 ± 500	1704 ± 136
20 to 24.9	218 ± 38	810 ± 165	1304 ± 46	1899 ± 82	870 ± 158
> to 25	16 ± 13	228 ± 77	278 ± 102	304 ± 56	169 ± 31

Distances covered (n = 5) during training, expressed in metres (mean ± SEM) for weeks 1, 2, 3, 4 and 5 (W1–W5) according to different speed categories, expressed in km/h. Stand tests (T0–3) over 5 weeks of training are indicated. The three training periods "Warm-up", "Intensive training" and "Tapering" are indicated

4. Discussion

According to our hypothesis, we showed a change in Low Frequency domain of spectral analysis in the standing position during a soccer training period. However, contrary to our hypothesis, this change was not clear due to a sympathetic alteration since the other spectral analysis domains were also altered (T, VLF and HF). This change reflected an overall increase in heart rate variability (total power of spectral analysis, T) and its meaning remains unclear. Nevertheless, our study shows the advantage of evaluating HRV by spectral analysis in standing position when monitoring training of intermittent sport disciplines. It also shows that the parasympathetic indicator, lnRMSSD in the supine position, the merits of which have been broadly demonstrated in endurance sports, is not useful in intermittent sports.

4.1. Training Programme and HRV response

GPS data (Table 2) validate the objectives defined in advance by the trainers. In fact, for all speeds, the distances covered increased between weeks one and two ("Warm-up" period). The greatest distances were also covered at speeds below 16 km/h, equating to aerobic work, and the lowest distances for speeds exceeding 16 km/h corresponding to high intensity work. Conversely, the greatest distances were covered between weeks 3 and 4 ("Intensive training" period), for all speeds greater than 16 km/h. Finally, during the fifth week ("Tapering" period), the distances covered decreased for all speeds compared to previous weeks. These data therefore, confirm the coaches' aim to have three successive training periods.

 CC BY NC ND

4.2. HRV in the supine position

We did not observe any difference in lnRMSSD in the supine position at any time during the training period while this marker has proved invaluable in endurance sports. We expected a significant increase of this marker between T0 and T1, i.e., between the end of a period of inactivity and the end of a gradual resumption of soccer ("Warmup" period, Carter et al. 2003; Mourot et al. 2004a; Buchheit et al. 2010; Vesterinen et al. 2015). Professional soccer players are highly trained and the period of inactivity was perhaps not long enough to detrain them significantly. We also expected a decrease while training load increased ("Intensive training", T1 to T2) and an increase at the end of the training period (end of "Tapering", T3, Oliveira et al. 2013; Boullosa et al. 2013). The lack of significant change in lnRMSSD in the supine position during this training period could be a consequence of heterogeneity induced in our study group by the training itself. All the players followed the same training programme while it is known that their positions (striker or side defender) alter training load on the first hand (Ingebrigtsen et al. 2015) and that training adaptation depend upon individuals on the second hand (Vesterinen et al. 2015). Moreover, several patterns of fatigue have been described including by means of HRV (Schmitt et al. 2015). Therefore, the training might have led to a heterogeneous group that included players well adapted and players with several fatigue patterns. As expected, HRV spectral analysis in the supine position did not provide additional information and remained unchanged despite a good reproducibility of this method over several weeks (Kowalewski and Urban 2004).

 CC BY NC ND

4.3. HRV in the standing position

In the standing position, training altered LF with highly significant differences but only at the end of the whole training period (end of "Tapering", T3). The intensity of the second period ("Intensive training") was appropriate in terms of players' conditioning according to soccer standards but it was probably not intensive enough to lead to spectral analysis changes. However, this LF alteration is not likely linked to a change in the sympathetic nervous system since usual witnesses of sympathetic activation during a stand test remained unchanged (LFnu, LF/HF). Moreover, differences in total power (overall heart rate variability, T) were also highly significant, as well as in cases of VLF and HF. Hence, training increased the overall heart rate variability but with no clear changes of the spectral indicators linked to sympathetic or to parasympathetic influences. The first possible explanation that comes to mind is that changes in T simply reflect the HR adaptation to training and that spectral analysis is not sensitive enough to detect the associated autonomic changes. However, the total power increase was not likely as a simple reflection of training HR decrease, since HRV did not parallel HR during 5 weeks of training (Table 1). HR decreased at T1, T2, and T3 in comparison with T0 while logT increased significantly only at T1 and T3 but not at T2 in comparison with T0 (Table 1). A second possible explanation is that breathing frequency adaptation to training influenced spectral analysis results and masked autonomics changes. We did not record breathing during our experiment. However, resting breathing is not supposed to change during a several week training (Manzi et al. 2009). Moreover, moderate alteration of resting breathing patterns does not influence spectral analysis results (Saboul et al. 2013). A third explanation is that the view on the cardiovascular regulation through autonomic activity and balance is too simple and does not reflect the complexity of the system. It is today clear that the traditional homeostatic view on the cardiovascular system should be revisited (Fortrat et al. 2016). More than 80 % of heart rate variability is not linked to the VLF, LF, and HF harmonics and is made of fractal noise, and other not yet well defined components (Yamamoto and Hughson 1994; Fortrat et al. 2013). Our results suggest that training influences the complex nonharmonic components of HRV and opens the way to further studies to characterize this adaptation and to identify an efficient tool to monitor training adaptation.

 CC BY NC ND

4.4. HRV and training load

The overall HRV (T) in the standing position increased when the training load was low ("Warm-up" T0 to T1 and "Tapering" T2 to T3, Table 1). By contrast, overall HRV (total power, T) remained unchanged when training load increased ("Intensive training" T1 to T2). We expected a decrease of LF in the standing position in response to the training load increase (Uusitalo et al. 2000; Hedelin et al. 2000; Mourot et al. 2004b). Portier et al. (2001) showed a 25 % LF decrease at the end of an intensive training period while Schmitt et al. (2013, 2015) demonstrated that fatigue is associated with a more than 40 % LF decrease. But the goal of the training period was to allow the players to reach a high level of performance at the beginning of the forthcoming competition. Therefore, when the training programme is analysed more accurately, we can see that each high intensity training day was followed by 2 days with a low training load, i.e., 72 h' recovery between each high intensity session. This allowed players to avoid a build-up of fatigue. Furthermore, in an attempt to aid their recovery, tools such as cold baths, massages and specific drinks, were made available to the players. These tools stimulate the autonomic nervous system (Al Haddad et al. 2010; Hansen et al. 2014; Wälchli et al. 2014). Moreover, this period of intensive training could also lead to heterogeneity in our group as in the case of HRV in the supine position.

 CC BY NC ND

5. Study Limitations

We did not check the players' lifestyle on ethical grounds. Lifestyle impacts on HRV in both the supine and standing positions (Gonçalves et al. 2015). Thus training was not the only parameter to affect HRV. Furthermore, GPS concerned only five players and only speeds were recorded. We know that quantification of speeds alone underestimates the training load because many highly intense actions (jumps, tackles, duels, etc.) are not taken into consideration (Carling et al. 2015). The design of our study could not include a control group since not any elite soccer player would agree to not train and to be deliberately not fit for the upcoming competition season. The group size is small. However, it matched with most of the other studies that use spectral analysis of HRV. Moreover, the group size was large enough to show highly significant differences of some spectral analysis indicators (Table 1). We studied professional soccer players who are not representative of recreational soccer players. However, focusing on elites athletes we reached clear conclusion about the interest of HRV in the standing position and the non usefulness of lnRMSSD in training adaptation monitoring in cases of intermittent sports. Our study included repeated measurements in the supine and in the standing position. Such a design may benefit from a two way analysis of variance to also study the change of position effect (from supine to standing). However, our study focused on the training effect and on the comparison of lnRMSSD while supine and HRV while standing. Our aim was not to study the position change effect. This one is well known including in the training context (Task Force 1996; Kowalewski and Urban 2004). Readers interested in standing adaptation could refer to the supplemental material (Table S1).

6. Conclusion

This study highlights the merits of evaluating HRV spectral analysis in standing in so-called intermittent sporting disciplines. It confirms that the autonomic nervous system influences can be evaluated overall to monitor training adaptation in an accurate manner. It also shows that the lnRMSSD parasympathetic indicator in the supine position is not useful during longitudinal follow-up of training in intermittent sporting disciplines.

 CC BY NC ND

Acknowledgments We wish to thank the players for taking part in this study. We also wish to thank the Stade Lavallois Mayenne FC which allowed and facilitated this study. We extend our thanks to the Centre Hospitalier Universitaire d'Angers (Angers University Hospital) and the Centre de Recherche Clinique of the Centre Hospitalier- Universitaire d'Angers (Angers University Hospital Clinical Research Centre) for their help with the administrative procedures for biomedical research projects. JOF benefits from the support of the Centre National d'Études Spatiales (National Centre for Spatial Studies) (CNES, Grant # 2014/4800000763). Compliance with ethical standards

Conflict of interest None.

Ethical approval All procedures performed in studies involving human participants were in accordance with the ethical standards of the institutional and/or national research committee and with the 1964 Helsinki declaration and its later amendments or comparable ethical standards.

7. References

Al Haddad H, Laursen PB, Chollet D, Lemaitre F, Ahmaidi S, Buchheit M (2010) Effect of cold or thermoneutral water immersion on post-exercise heart rate recovery and heart rate variability indices. Auton Neurosci 156:111-116. doi: 10.1016/j.autneu.2010.03.017

Atlaoui D, Pichot V, Lacoste L, Barale F, Lacour JR, Chatard JC (2007) Heart rate variability, training variation and performance in elite swimmers. Int J Sports Med 28:394-400

Boullosa DA, Abreu L, Nakamura FY, Muñoz VE, Domínguez E, Leicht AS (2013) Cardiac autonomic adaptations in elite Spanish soccer players during preseason. Int J Sports Physiol Perform 8:400-409

Buchheit M, Chivot A, Parouty J, Mercier D, Al Haddad H, Laursen PB, Ahmaidi S (2010) Monitoring endurance running performance using cardiac parasympathetic function. Eur J Appl Physiol 108:1153-1167. doi: 10.1007/s00421-009-1317-x

Buchheit M (2014) Monitoring training status with HR measures: do all roads lead to Rome? Front Physiol 5:73. doi: 10.3389/fphys.2014.00073

Carling C, Gregson W, McCall A, Moreira A, Wong del P, Bradley PS (2015) Match running performance during fixture congestion in elite soccer: research issues and future directions. Sports Med 45:605-613. doi: 10.1007/s40279-015-0313-z

Carter JB, Banister EW, Blaber AP (2003) The effect of age and gender on heart rate variability after endurance training. Med Sci Sports Exerc 35:1333-1340

Fortrat JO, Baum C, Jeanguillaume C, Custaud MA (2013) Noisy fluctuation of heart rate indicates cardiovascular system instability. Eur J Appl Physiol 113:2253-2261. doi: 10.1007/s00421-013-2655-2

Fortrat JO, Levrard T, Courcinous S, Victor J. (2016) Self-organization of blood pressure regulation: experimental evidence. Front. Physiol 7:112. doi: 10.3389/fphys.2016.00112

Gonçalves TR, Farinatti Pde T, Gurgel JL, da Silva Soares PP (2015) Correlation between cardiac autonomic modulation in response to orthostatic stress and indicators of quality of life, physical capacity, and physical activity in healthy individuals. J Strength Cond Res 29:1415-1421. doi: 10.1519/JSC.0000000000000769

Halson SL (2014) Monitoring training load to understand fatigue in athletes. Sports Med 2:S139-147. doi: 10.1007/s40279-014-0253-z

Hansen AL, Dahl L, Olson G, Thornton D, Graff IE, Frøyland L, Thayer JF, Pallesen S (2014) Fish consumption, sleep, daily functioning, and heart rate variability. J Clin Sleep Med 10:567-575. doi: 10.5664/jcsm.3714

Hedelin R, Wiklund U, Bjerle P, Henriksson-Larsén K (2000) Pre- and post-season heart rate variability in adolescent cross-country skiers. Scand J Med Sci Sports 10:298-303

Jansen AS, Nguyen XV, Karpitskiy V, Mettenleiter TC, Loewy AD (1995) Central command neurons of the sympathetic nervous system: basis of the fight-or-flight response. Science 270: 644-659

Ingebrigtsen J, Dalen T, Hjelde GH, Drust B, Wisløff U (2015) Acceleration and sprint profiles of a professional elite football team in match play. Eur J Sport Sci 15:101-110. doi: 10.1080/17461391.2014.933879

Kiviniemi AM, Hautala AJ, Kinnunen H, Tulppo MP (2007) Endurance training guided individually by daily heart rate variability measurements. Eur J Appl Physiol 101:743-751

Kowalewski MA, Urban M (2004) Short- and long-term reproducibility of autonomic measures in supine and standing positions. Clin Sci (Lond) 106:61-66

Le Meur Y, Pichon A, Schaal K, Schmitt L, Louis J, Gueneron J, Vidal PP, Hausswirth C (2013) Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes. Med Sci Sports Exerc 45:2061-2071. doi: 10.1249/MSS.0b013e3182980125

Manzi V, Castagna C, Padua E, Lombardo M, D'Ottavio S, Massaro M, Volterrani M, Iellamo F (2009) Dose-response relationship of autonomic nervous system responses to individualized training impulse in marathon runners. Am J Physiol 296:H1733-1740. doi: 10.1152/ajpheart.00054.2009

Moak JP, Goldstein DS, Eldadah BA, Saleem A, Holmes C, Pechnik S, Sharabi Y (2009) Supine low-frequency power of heart rate variability reflects baroreflex function, not cardiac sympathetic innervation. Cleve Clin J Med 76 Suppl 2:S51-59. doi: 10.3949/ccjm.76.s2.11

Mourot L, Bouhaddi M, Perrey S, Rouillon JD, Regnard J (2004a) Quantitative Poincaré plot analysis of heart rate variability: effect of endurance training. Eur J Appl Physiol 91:79-87

Mourot L, Bouhaddi M, Tordi N, Rouillon JD, Regnard J (2004b) Short- and long-term effects of a single bout of exercise on heart rate variability: comparison between constant and interval training exercises. Eur J Appl Physiol 92:508-517

Naranjo Orellana J, de la Cruz Torres B, Sarabia Cachadiña E, de Hoyo M, Domínguez Cobo S (2015) Two new indexes for the assessment of autonomic balance in elite soccer players. Int J Sports Physiol Perform 10:452-457. doi: 10.1123/ijspp.2014-0235

Oliveira RS, Leicht AS, Bishop D, Barbero-Álvarez JC, Nakamura FY (2013) Seasonal changes in physical performance and heart rate variability in high level futsal players. Int J Sports Med 34:424-430. doi: 10.1055/s-0032-1323720

Olufsen MS, Alston AV, Tran HT, Ottesen JT, Novak V (2008) Modeling heart rate regulation-part I: sit-to-stand versus head-up tilt. Cardiovasc Eng 8:73-87

Plews DJ, Laursen PB, Stanley J, Kilding AE, Buchheit M (2013) Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: opening the door to effective monitoring. Sports Med 43:773-781. doi: 10.1007/s40279-013-0071-8

Pichon AP, de Bisschop C, Roulaud M, Denjean A, Papelier Y (2004) Spectral analysis of heart rate variability during exercise in trained subjects. Med Sci Sports Exerc 36: 1702-1708

Perini R, Veicsteinas A (2003) Heart rate variability and autonomic activity at rest and during exercise in various physiological conditions. Eur J Appl Physiol 90: 317-325

Portier H, Louisy F, Laude D, Berthelot M, Guézennec CY (2001) Intense endurance training on heart rate and blood pressure variability in runners. Med Sci Sports Exerc 33:1120-1125

Rahman F1, Pechnik S, Gross D, Sewell L, Goldstein DS (2011) Low frequency power of heart rate variability reflects baroreflex function, not cardiac sympathetic innervation. Clin Auton Res 21:133-141. doi: 10.1007/s10286-010-0098-y

Saboul D, Pialoux V, Hautier C (2013) The impact of breathing on HRV measurements: implications for the longitudinal follow-up of athletes. Eur J Sport Sci 13:534-542. doi: 10.1080/17461391.2013.767947

Schmitt L, Regnard J, Desmarets M, Mauny F, Mourot L, Fouillot JP, Coulmy N, Millet G (2013) Fatigue shifts and scatters heart rate variability in elite endurance athletes. PLoS One 8(8):e71588. doi: 10.1371/journal.pone.0071588. eCollection 2013

Schmitt L, Regnard J, Parmentier AL, Mauny F, Mourot L, Coulmy N, Millet GP (2015) Typology of "Fatigue" by Heart Rate Variability Analysis in Elite Nordic-skiers. Int J Sports Med 36:999-1007. doi: 10.1055/s-0035-1548885

Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology (1996) Heart rate variability Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. European Heart Journal 17:354–381

Uusitalo AL, Uusitalo AJ, Rusko HK (2000) Heart rate and blood pressure variability during heavy training and overtraining in the female athlete. Int J Sports Med 21:45-53

Vesterinen V, Häkkinen K, Hynynen E, Mikkola J, Hokka L, Nummela A (2013) Heart rate variability in prediction of individual adaptation to endurance training in recreational endurance runners. Scand J Med Sci Sports 23:171-180. doi: 10.1111/j.1600-0838.2011.01365.x

Vesterinen V, Häkkinen K, Laine T, Hynynen E, Mikkola J, Nummela A (2015) Predictors of individual adaptation to high-volume or high-intensity endurance training in recreational endurance runners. Scand J Med Sci Sports In press. doi: 10.1111/sms.12530

Wälchli C, Saltzwedel G, Krüerke D, Kaufmann C, Schnorr B, Rist L, Eberhard J, Decker M, Simões-Wüst AP (2014) Physiologic effects of rhythmical massage: a prospective exploratory cohort study. J Altern Complement Med 20:507-515. doi: 10.1089/acm.2012.0833

Yamamoto Y, Hughson RL (1994) On the fractal nature of heart rate variability in humans: effects of data length and beta-adrenergic blockade. Am J Physiol 266:R40-49

Supplemental Material

Table S1 Heart Rate Variability, Difference between standing and supine position.

Marker	T0	T1	T2	T3
log T (ms²)	0.07 ± 0.07	0.13 ± 0.06	0.08 ± 0.06	0.19 ± 0.06
log VLF (ms²)	0.30 ± 0.08	0.33 ± 0.07	0.26 ± 0.09	0.33 ± 0.07
log LF (ms²)	0.17 ± 0.09	0.20 ± 0.07	0.15 ± 0.08	0.33 ± 0.06
log LFnu (n.u)	0.21 ± 0.03	0.21 ± 0.03	0.18 ± 0.03	0.22 ± 0.04
log HF (ms²)	-0.64 ± 0.10	-0.48 ± 0.07	-0.48 ± 0.06	-0.43 ± 0.11
log HFnu (n.u)	-0.60 ± 0.06	-0.48 ± 0.03	-0.44 ± 0.06	-0.55 ± 0.07
log LF/HF	0.81 ± 0.09	0.69 ± 0.04	0.63 ± 0.08	0.78 ± 0.09

T0, T1, T2 and T3 correspond to the initial evaluation and these at the end of the three training phases ("Warm-up", "Intensive Training" and "Tapering", respectively) over a period of 5 weeks. logT: Logarithm of Total power; logVLF: Logarithm of Very Low Frequencies; logLF: Logarithm of Low Frequencies; logLFnu: Logarithm of Very Low Frequencies in normalised units; logHF: Logarithm of High Frequencies; logHFnu: Logarithm of High Frequencies in normalised units; logLF/HF: Logarithm of Low frequencies/High frequencies ratio. No differences have been observed.

Préambule à l'étude 4

Cette étude fait suite à une observation de terrain. Durant 5 années, j'ai observé dans mon quotidien de préparateur physique d'une équipe professionnelle de football que les joueurs se sentaient « en forme » ou « fatigués » lorsque la puissance spectrale en basse fréquence de la VFC en position debout était respectivement élevée ou diminuées par rapport à leurs valeurs habituelles. Cette observation ne semblait pas se vérifier dans la position couché.

Quelques auteurs associent effectivement la fatigue à une diminution de la puissance spectrale en basse fréquence en position debout. Cependant, aucune étude à notre connaissance ne s'intéresse au lien entre la forme et cette puissance spectrale. Seuls les indicateurs parasympathiques de la VFC sont associés à la performance dans les sports aérobies notamment.

L'objectif de notre étude était donc de vérifier cette observation de terrain. Nous avons émis l'hypothèse que la puissance spectrale en basse fréquence en position debout est associée à la sensation de forme physique perçue chez des joueurs de football professionnels en compétition

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons choisi une période de compétition. Elle garantit un niveau d'implication maximal du joueur. De plus, l'étude s'est déroulée durant 12 jours, période durant laquelle les joueurs ont enchainés 4 matchs. Cette période n'était pas suffisamment longue pour entraîner une modification des qualités physiques des joueurs (Force, Vitesse, VO2 max). Ainsi, les éventuelles variations de leur forme physique seraient davantage liées à la succession des matchs, des voyages, du mauvais sommeil… qu'à leurs qualités physiques préalablement développées.

Etude 4

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE PERCEPTION OF PHYSICAL FITNESS AND HEART RATE VARIABILITY IN PROFESSIONAL SOCCER PLAYERS

G. RAVÉ[1], H. ZOUHAL[2], W. KEBSI[2], & J.O. FORTRAT[3]

[1] Stade Lavallois MFC, Plaine des Gandonnières, rue Georges Coupeau 5300 Laval, France
[2] Movement, Sport and health Sciences laboratory (M2S). UFR-APS, University of Rennes 2-ENS Rennes. Avenue Tillon, CS 24414, 35044 Rennes Cedex, France
[3] CNRS 6214 Inserm 1083 Faculté de Médecine 49045 Angers, France.

The journal of sports medicine and physical fitness
Soumis (juin 2016)

Relation entre la perception de la forme physique et la variabilité de la fréquence cardiaque chez des footballeurs professionnels

Résumé

But - Il existe un besoin d'outils de suivi de l'adaptation à l'entrainement. Notre objectif était de montrer que la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) en position debout est une mesure objective de la perception de la forme physique (PFP).

Méthode - Lors d'une période de matchs rapprochés (4 matchs en 12 jours), la VFC en position couché et debout a été enregistrée chez 14 footballeurs professionnels avant chaque match. La PFP était évaluée après chaque match grâce à une échelle visuelle analogique. Nous avons déterminé l'indicateur de VFC le plus utilisé dans le contexte de l'entraînement (Root Mean Square of the Successives Differences : RMSSD-couché, indicateur parasympathique) ainsi que les indicateurs obtenus par analyse spectrale en position couché et debout (parasympathiques, sympathiques et variabilité globale).

Résultats – En position couché, la corrélation entre RMSSD et PFP est modérée (>0,3-0,5). Elle est également modérée pour certains indicateurs de l'analyse spectrale mais large (>0.5-0.7) pour l'un d'eux (Low Frequencies, LF). En position debout, la corrélation devient large pour deux de ces indicateurs (LF et Total Power). Enfin, aucune corrélation entre RMSSD et HFnu-couché (indicateur parasympathique) alors qu'elle est très large pour RMSSD et Total Power (variabilité globale).

Conclusion - La variabilité de la fréquence cardiaque en position debout est un outil objectif évaluant la forme physique d'un joueur professionnel de football. Dans le contexte du sport collectif, RMSSD est le reflet de la variabilité globale de la VFC et non de l'influence parasympathique comme communément admis.

Mots-clés *sport intermittent, stand test, système nerveux autonome*

The relationship between the perception of physical fitness and heart rate variability in professional soccer players

Abstract

Purpose - There is a need for tools for monitoring training adaptation. The aim of this study is to show that heart rate variability (HRV) in the standing position is an objective measure of the perception of physical fitness (PPF).

METHODS - During a period of match congestion, supine and standing HRV of 14 professional soccer players was measured before each of the four matches over twelve days. PPF was assessed after each match using a visual analogue scale. We determined the HRV indicator most often used in the context of training (supine Root Mean Square of the Successive Differences: RMSSD, parasympathetic indicator), as well as the indicators obtained through spectral analysis in both supine and standing position (parasympathetic, sympathetic and overall variability).

RESULTS - In the supine position, the correlation between RMSSD and PPF is moderate (>0.3-0.5). It is also moderate for some indicators of the spectral analysis, but large (>0.5-0.7) for one of them (Low Frequencies, LF). In the standing position, the correlation is large for two of these indicators (LF and Total Power: overall variability). Finally, there was no correlation between RMSSD and HFnu (parasympathetic indicator), while it is very large in the case of RMSSD and Total Power.

CONCLUSION - Heart rate variability in the standing position is an objective tool used to assess the physical fitness of a professional soccer player. In the context of team sports, RMSSD reflects the overall variability of HRV and not parasympathetic influence, as is commonly accepted.

Keywords *autonomic nervous system, intermittent sports, stand test*

1. Introduction

Heart rate variability (HRV) is a simple method used to assess the autonomic nervous system [1]. It provides sympathetic and parasympathetic indicators through calculations based on heart rate (HR) recordings [2]. HRV is often recognised in mainly aerobic individual sports. Parasympathetic indicators derived from the frequency analysis (High frequencies: HF, obtained through spectral analysis of recordings) or the time analysis (Root Mean Square of the Successive Difference: RMSSD, obtained through statistical analysis) are sensitive to the training load in aerobic sports [3,4] and can also be an element in predicting one's physical fitness [5-7]. In team sports, aerobic prevalence is less pronounced and physical fitness is very difficult to assess [8], given that it depends on situational factors (tactics, score, referee, etc.), which means that games cannot be reproduced or standardised [9]. Existing studies are contradictory when it comes to the benefits of RMSSD in monitoring training for team sports [10-14]. Standing position requires a general adaption of the organism, which puts strain on the ANS [1]. Recently, Schmitt et al.[15] have shown that exploring HRV through time and frequency analyses, including both the supine and standing positions, makes it possible to characterise the states of fatigue. It would therefore seem that the standing position allows for a rising of awareness of HRV analysis in the context of team sports.

Consequently, we hypothesized that HRV in the standing position monitored before a match makes it possible to gain a reflection of the perception of physical fitness assessed in professional soccer players after a match during a competition period.

2. Materials and Methods

2.1. Participants

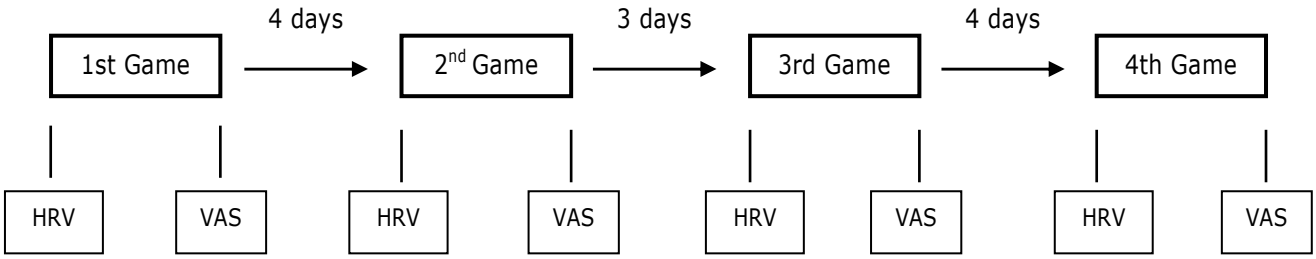
Fourteen professional soccer players (mean age 27.9, s_x-=4.3 years; height 1.79, s_x-=0.04 m; weight 75.2, s_x-=6.8 kg; VO_{2max} 58, s_x-=4 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) from the French soccer league *Ligue 2* volunteered to take part in the study after being informed of the procedures, which were approved by the ethic committee of Angers (France). Informed consent was obtained from all individual participants included in the study. During the study, no dietary interventions were undertaken.

 CC BY NC ND

2.2. Experimental Design

The study took place during an in-season period, during a series of four matches played over twelve days (Figure 1).

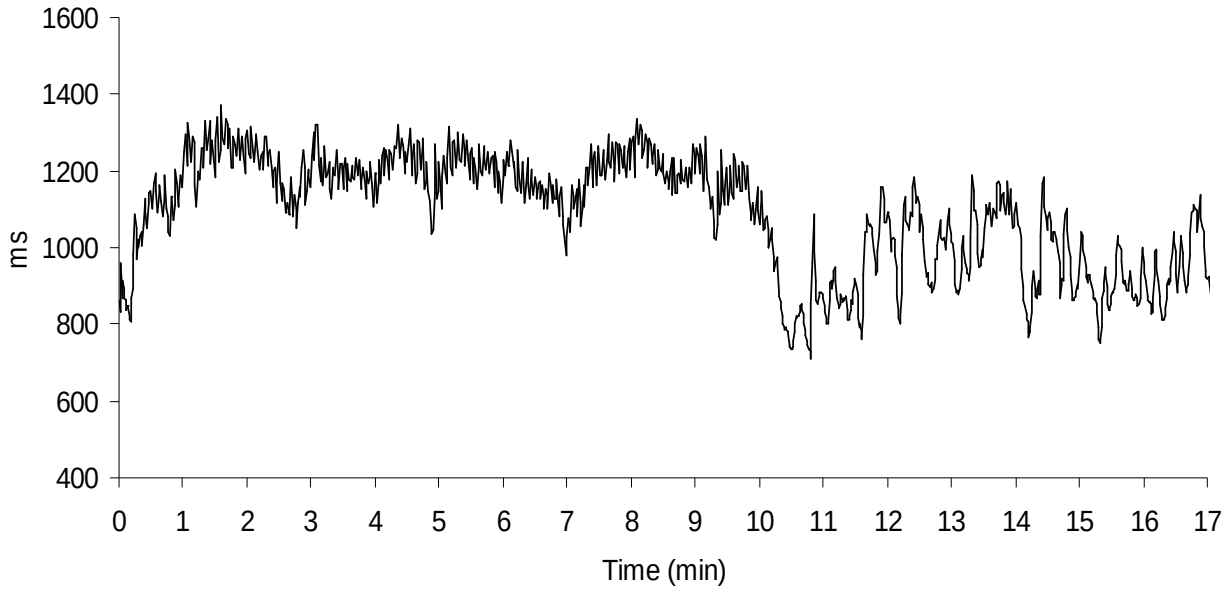
Figure 1 Experimental Design.



HRV: Heart Rate Variability, and VAS: Visual Analogue Scale.

Before each match, at 8:30 am, before breakfast, the players would all perform a stand test (10 minutes in the supine position, followed by 7 minutes standing, without speaking or moving). HR was recorded beat by beat during the entirety of the test (Figure 2) (PolarTeamSystem2®, Kempele, Finland).

Figure 2 Example of a heart rate recording during a stand test



Example of a heart rate recording (RR intervals on the Y axis) beat by beat during a stand test (10 minutes in the supine positions followed by 7 minutes in the standing position). RR intervals on the Y axis in ms and the Time on the X axis in minutes.

We quantified physical fitness via self-assessment, using a Visual Analogue Scale (VAS). This tool is used in medicine to assess pain, and in sports to assess recovery and fatigue [16-18]. After each match, we asked each player to use this tool in a response to the question: "How do you evaluate your level of physical fitness?"

2.3. Heart Rate Variability analysis

We carried out HRV frequency and time analyses to obtain parasympathetic and sympathetic indicators of the ANS (aHRV v11.0.4, Nevrokard Kiauta®, Slovenia). We determined the spectral power density by means of frequency analysis of 512 RR-interval values after re-sampling at 2 Hz from the fifth minute of the ten-minute phase in the supine position. The breathing rate was not controlled nor recorded, and we did not record blood pressure during this in-field experiment. The filtering of artefacts and ectopic beats was performed manually (aHRV software). The time domain analysis involved determining the RMSSD (parasympathetic indicator). As recommend by Task Force [1], the frequency analysis involved obtaining the spectral power (ms^2/Hz) of Very Low (VLF ≤0.04Hz), Low (0.04Hz ≤ LF ≤ 0.15Hz) and High (0.15Hz ≤ HF ≤ 0.40Hz) Frequencies as well as the Total power (or overall HRV, T ≤0.4Hz), normalised LF and HF power (LFnu and HFnu, respectively, no unit), and LF/HF ratio. According to the Task Force [1], HF are under the parasympathetic influences while LF are under the influence of both the parasympathetic and sympathetic nervous system. However, LF changes tracks sympathetic changes during a stand test. HF and LF could be normalised according to Total Power (T) in order to avoid the confounding effects of overall HRV and HR changes. Normalised HF and LF are indicators of parasympathetic and sympathetic influences, respectively (HFnu and LFnu). LF/HF ratio is an indicator of the autonomic balance between sympathetic and parasympathetic system. The meaning of VLF has remained unclear. In the standing position, the same procedure was carried out on 512 consecutive RR-interval values. The first two minutes of this phase used to adapt to the new position were routinely eliminated.

 CC BY NC ND

2.4. Statistical analysis

Data were expressed as mean values ± standard deviation to the mean (SEM). Spearman's tests were used to assess the relationships between HR, RMSSD, T, VLF, HF, LF, HFnu, LFnu, LF/HF ratio and Fitness Perception (SPSS 20.0; SPSS Inc, Chicago). We also verified the relationships (Spearman's tests) between RMSSD and spectral analysis indicators HFnu and T because RMSSD and HFnu are both meant to evaluate parasympathetic influences. The magnitude of the correlations was determined using Hopkins's scale [19]: $r<0.1$, trivial; 0.1–0.3, small; >0.3–0.5, moderate; >0.5–0.7, large; >0.7–0.9, very large; >0.9, nearly perfect; and 1 perfect. The reliability was assessed by intra-class correlations (ICCs). Significant differences were assumed when $p<0.01$ because the large number of comparisons.

 CC BY NC ND

3. Results

The perception of physical fitness, the heart rate and the HRV are shown in Table I.

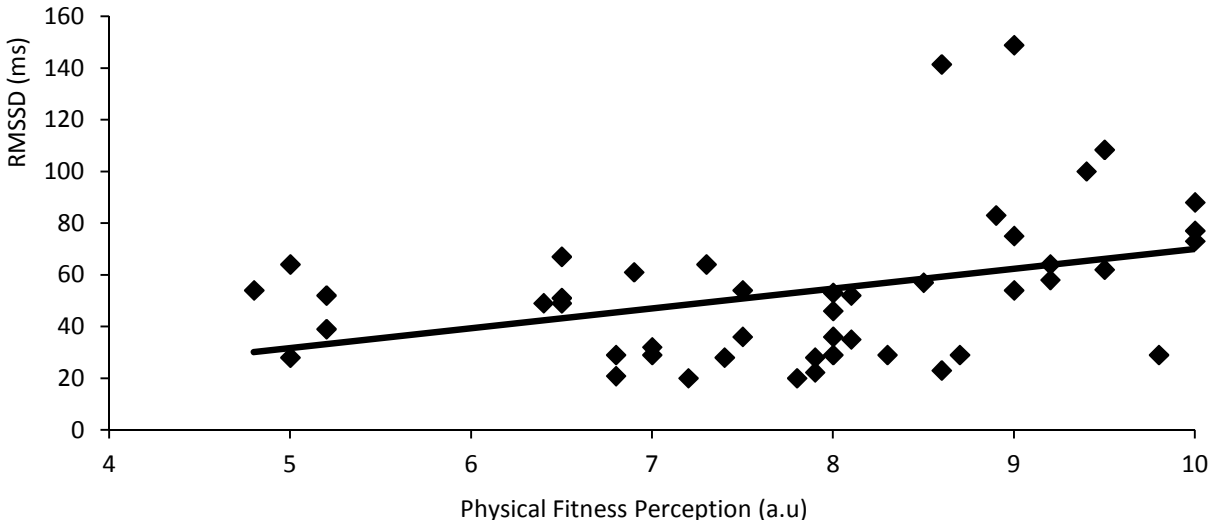
Table I Mean±s and correlation between the perception of physical fitness and HRV indicators.

	Indicators	mean±s	magnitude	p-value
	Physical Fitness (a.u)	7.8±0.2		
Supine	HR (bpm)	57.1±1.1	-	ns
(n=46)	RMSSD (ms)	53.2±4.4	moderate	**
	T (ms²)	3668.8±521.3	moderate	**
	VLF (ms²)	1213.6±182.7	-	ns
	LF (ms²)	1440.6±194.7	large	***
	LFnu (n.u)	58.7±2.2	moderate	**
	HF (ms²)	1014.5±200.7	-	ns
	HFnu (n.u)	41.3±2.2	moderate	**
	LF/HF	1.8±0.2	moderate	**
Standing	HR (bpm)	71.2±1.5	-	ns
(n=46)	T (ms²)	5792.3±608.0	large	***
	VLF (ms²)	2776.5±371.5	moderate	**
	LF (ms²)	2542.7±259.0	large	***
	LFnu (n.u)	85.7±1.2	-	ns
	HF (ms²)	473.0±76.8	moderate	**
	HFnu (n.u)	14.3±1.2	-	ns
	LF/HF	9.2±1.1	-	ns

HR: Heart Rate; RMSSD: Root Mean Square of the Successive Differences; T: Total power; VLF: Very Low Frequencies; LF: Low Frequencies; HF: High Frequencies; nu is for normalization by T (n.u.: no unit).n=observation number. ns: not significant, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

The correlation between RMSSD (supine position) and the perception of physical fitness is moderate (Table I and Figure 3).

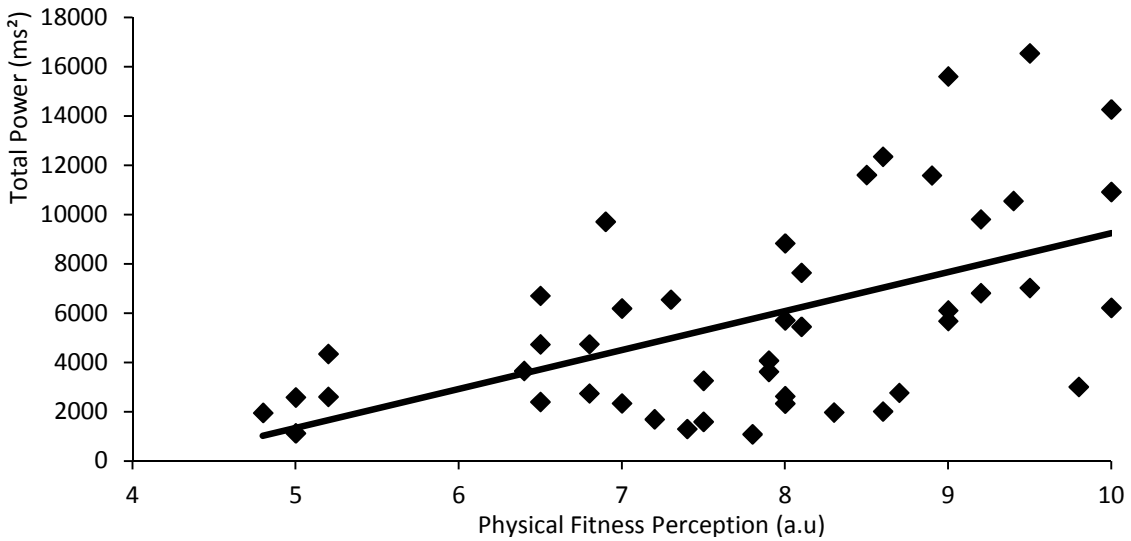
Figure 3 Correlation between the perception of physical fitness and RMSSD



RMSSD: Root mean square of successive difference (ms), the perception of physical fitness in arbitrary units (a.u). The perception of physical fitness is on the X axis and RMSSD on the Y axis.

A moderate link is observed when HRV in the supine position is assessed through spectral analysis, given that four indicators obtained through such an analysis show a moderate correlation, while one (and only one) of these indicators (LF) shows a large correlation. In the standing position, the correlation is still large for this particular indicator, but it also becomes large in the case of the indicator T (Figure 4), thus showing that the perception of physical fitness can be more effectively evaluated through frequency analysis when it is carried out in the standing position.

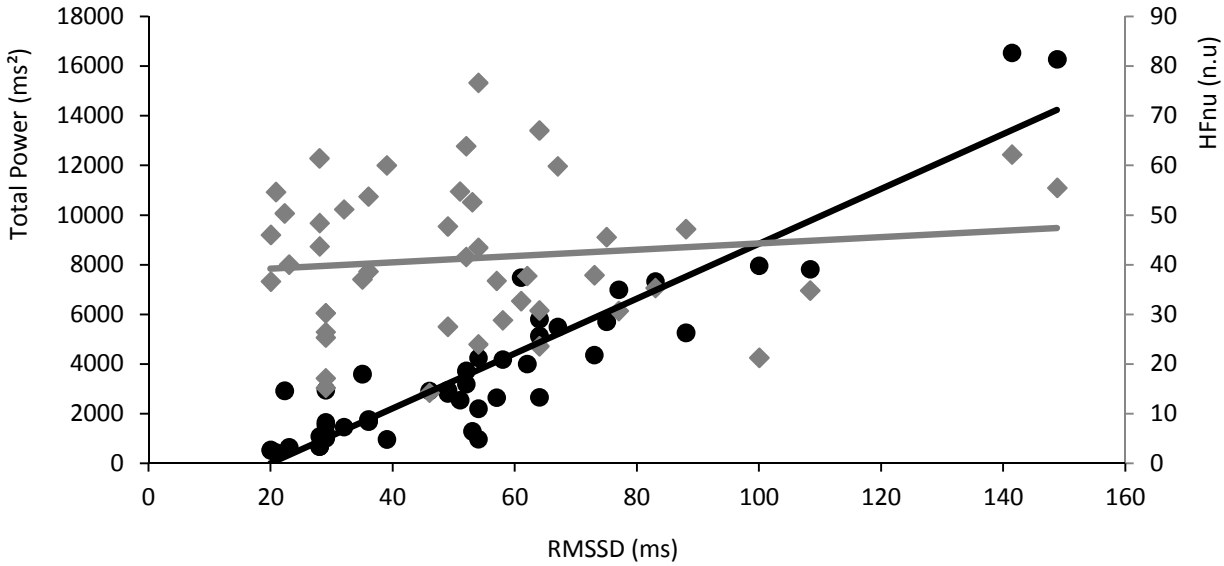
Figure 4 Correlation between the perception of physical fitness and T



T: Total Power (ms²), the perception of physical fitness in arbitrary units (a.u). The perception of physical fitness is on the X axis and T on Y the axis.

While both RMSSD and HFnu are considered to be parasympathetic indicators, only a trivial correlation is found (Spearman r=0,021 at p=0,885) (Figure 5). However, there is a very large correlation between RMSSD and T (Spearman r=0.861 at p<0.0001) (Figure 5).

Figure 5 Correlation between RMSSD and HFnu (grey) and T (black).



RMSSD: Root mean square of successive difference (ms), HFnu: High frequencies in normalised units (n.u) and Total power (ms²). RMSSD is on X axis and T on the Y primary, HFnu on the Y secondary axis.

4. Discussion

Our study confirms the benefits of RMSSD on the overall variability of HRV. However, spectral analysis in the standing position makes it possible to obtain a better reflection of perceived physical fitness. Moreover, in the context of sport training, RMSSD in fact does not reflect parasympathetic influences, as is wrongly assumed in literature.

4.1. The benefits of HRV

Our study shows that a player perceives himself as physically fit when his overall variability (Total power, T) is high in either the supine or standing position. However, the correlation between physical fitness and T is more significant in the standing position compared to the supine position (large and moderate, respectively, Table 1). Schmitt et al. [20] have also shown that a weak HRV variability in both the supine and standing positions is linked to a state of fatigue in elite cross-country skiers. Frequency analysis of HRV in the supine position shows that LF, LFnu and LF/HF are correlated to physical fitness. While LF is under the influence of the sympathetic system, LFnu and LF/HF are considered as a reflection of how significant this influence is [1]. Moreover, HF, under parasympathetic influence, is not correlated to physical fitness, but the indicator of parasympathetic influence (HFnu) is, if negatively so.

As a result, in the supine position, a significant overall variability associated with a sympathovagal balance in favour of the sympathetic branch of the ANS is thus linked to a good perception of physical fitness. Similarly, during short swimming competitions (less than 1 minute), LFnu is correlated with performance while HF is also, but negatively [21].

 CC BY NC ND

Switching to a standing position is accompanied by the activation of the sympathetic nervous system at the expense of the parasympathetic [1]. In our study, we observed these changes through an increase of LF (+43%), LFnu (+31%), LF/HF (+80%) and a decrease of HF (-114%) and HFnu (-189%) (Table S1), but also through increased HR (+20%). With this in mind, one can assume that the standing position highlights the link between the sympathetic nervous system and physical fitness. Conversely, in the standing position, frequency analysis does not make it possible to identify which branch of the ANS – sympathetic or parasympathetic – is favourable to the perception of physical fitness. We have previously shown that variations of T in the standing position reflect the training load of the soccer player without any apparent modification of sympathetic and parasympathetic indicators of the frequency analysis [13].

4.2. RMSSD does not reflect the parasympathetic influence

In the case of individual endurance sports, performance is correlated with parasympathetic indicators of HRV obtained through time or frequency analysis in the supine position [5-7]. As a matter of fact, RMSSD has become the reference indicator in sports training [22]. Our study confirms the benefits of this indicator, including in team sports. However, the correlation between RMSSD and physical fitness is moderate (Table 1). Moreover, it is even worse with the other parasympathetic indicators (absent with HF and inverse with HFnu). Previously, we have shown that HRV changes during a training period of several weeks without a clear sympathetic or parasympathetic adaptation [13]. We therefore call into question the significance of the RMSSD marker, which is possibly not simply linked to the parasympathetic nervous system. Unlike the HFnu marker, the RMSSD marker does not benefit from normalisation with regard to the overall HRV. The very large correlation between RMSSD and T (overall HRV) shows that the RMSSD variations observed in this particular sports context are wholly explained by the overall HRV and not by a parasympathetic variation (Figure 5). HRV reflects the complexity of the regulation mechanisms and of their interaction [23]. The typical interpretation of HRV with regard to the activation or inhibition of the sympathetic or parasympathetic nervous system is probably simplistic and impaired when the organism is subtly adapting to sports training.

 CC BY NC ND

4.3. The benefits of associating HRV with other markers

The correlation between HRV and the perception of physical fitness is outlined as moderate (r>0.3-0.5) to large (r>0.5-0.7). None of the HRV indicators make it possible to define a fitness state with significance close to 1. During a standing test, HRV offers information about the player's fitness state, but this is not sufficient for obtaining certainty. The neuromuscular and cardiovascular constraints linked to soccer must be taken into account. Physical performance in soccer is not only linked to the cardiovascular system, but also the neuromuscular system [24]. A player must be able to perform accelerations, sprints, braking and changes of direction over a period of 90 minutes. As such, a player's physical performance is negatively correlated to the muscular training load [25]. This particular aspect of performance, linked to the central nervous system, probably cannot be simply reflected with an indirect evaluation of the ANS through HRV. In young soccer players, Buccheit et al. [26] observed a relationship between parasympathetic indicators and a cardiorespiratory test (Vameval test), while no relationship was observed between these indicators and neuromuscular tests. HRV is probably an indication of the player's ability to manage the cardiovascular loads of the activity. Combining an evaluation of the ANS through HRV with a neuromuscular evaluation could thus make it possible to optimise the monitoring of the professional soccer player.

4.4. Limitations

The players' anxiety levels linked to the competition has not been measured, even though the latter probably had an impact on the sympathovagal balance of the ANS [27]. Indeed, Edmonds et al. [28] observed a decrease in RMSSD, HF and HFnu and an increase in LF on the day of a rugby match. Moreover, there is a lack of consensus regarding the reliability of LF in the supine position. Cyprian [29] observed a disparity in LF in 94% supine position between two tests carried out 30 minutes apart, while Kowalewski and Urban [30] have shown a good reproducibility of LF in both the supine and standing positions. On the other hand, breathing was not monitored while the heart rate was being recorded, yet the latter has an impact on HF, though limited [31].

 CC BY NC ND

5. Conclusion

This study shows that there is a link between the perception of a professional soccer player's physical fitness and HRV during a stand test. What is more, in the context of team sports, RMSSD is more the reflection of the overall variability of HRV rather than of the parasympathetic influence. Finally, HRV must be combined with a neuromuscular evaluation in order to determine the exact physical fitness state of a professional soccer player.

Acknowledgments

We thank the players, the Stade Lavallois Mayenne FC, the Centre Hospitalo-Universitaire d'Angers and its CRC. JOF is supported by CNES under grant No. 2014/4800000763.

Congress : No

Funding: No

Conflicts of interest : No

 CC BY NC ND

6. References

1-Task Force of the European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Eur Heart J*. 1996;17(3):354–81.

2-Bellenger CR, Fuller JT, Thomson RL, Davison K, Robertson EY, Buckley JD. Monitoring athletic training status through autonomic heart rate regulation: A systematic review and meta-analysis. *Sports Med*. 2016 [Epub ahead of print] DOI: 10.1007/s40279-016-0484-2

3-Plews DJ, Laursen PB, Stanley J, Kilding AE, Buchheit M. Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: opening the door to effective monitoring. *Sports Med*. 2013;43(3):773-81.

4-Vesterinen V, Häkkinen K, Laine T, Hynynen E, Mikkola J, Nummela A. Predictors of individual adaptation to high-volume or high-intensity endurance training in recreational endurance runners. *Scand J Med Sci Sports*. 2015 [Epub ahead of print]

5-Buchheit M, Chivot A, Parouty J, Mercier D, Al Haddad H, Laursen PB, Ahmaidi S. Monitoring endurance running performance using cardiac parasympathetic function. *Eur J Appl Physiolo*. 2010;108(6):1153-67.

6-Schmitt L, Hellard P, Millet GP, Roels B, Richalet JP, Fouillot JP. Heart rate variability and performance at two different altitudes in well-trained swimmers. *Int J Sports Med*. 2006;27(3):226-31.

7-Stanley J, D'Auria S, Buchheit M. Cardiac parasympathetic activity and race performance: an elite triathlete case study. *Int J Sports Physiol Perform*. 2015;10(4):528-34.

8-Halson S. Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Med*. 2014;44(2):139–47.

9-Lago-Peñas C. The role of situational variables in analysing physical performance in soccer. *J Hum Kinet*. 2012;35:89-95.

10-De Freitas VH, Pereira LA, De Souza EA, Leicht AS, Bertollo M, Nakamura FY. Sensitivity of the Yo-Yo Intermittent Recovery Test and cardiac autonomic responses to training in futsal players. *Int J Sports Physiol Perform.* 2015;10(5):553-8.

11-Flatt AA, Esco MR, Nakamura FY, Plews DJ. Interpreting daily heart rate variability changes in collegiate female soccer players. *J Sports Med Phys Fitness*. 2016 [Epub ahead of print]

12-Nakamura FY, Flatt AA, Pereira LA, Ramirez-Campillo R, Loturco I, Esco M. Ultra-Short-Term Heart Rate Variability is Sensitive to Training Effects in Team Sports Players. *J Sports Sci Med*. 2015;14(3):602-5.

13-Ravé G, Fortrat JO. Heart Rate Variability in the standing position reflects training adaptation in professional soccer players. *Eur J Appl Physiol*. 2016 [Epub ahead of print]

14-Thorpe RT, Strudwick AJ, Buchheit M, Atkinson G, Drust B, Gregson W. The Tracking of Morning Fatigue Status Across In-Season Training Weeks in Elite Soccer Players. *Int J Sports Physiol Perform*. 2016 [Epub ahead of print]

15-Schmitt L, Regnard J, Millet GP. Monitoring Fatigue Status with HRV Measures in Elite Athletes: An Avenue Beyond RMSSD? *Front Physiol*. 2015;6:343.

16-Bijur PE, Silver W, Gallagher EJ. Reliability of the visual analog scale for measurement of acute pain. *Acad Emerg Med*. 2001;8(12):1153-57.

17-Le Meur Y, Pichon A, Schaal K, Schmitt L, Louis J, Gueneron J, Hausswirth C. Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2013;45(11):2061-71.

18-Crowcroft S, Duffield R, McCleave E, Slattery K, Wallace LK, Coutts AJ. Monitoring training to assess changes in fitness and fatigue: The effects of training in heat and hypoxia. *Scand J Med Sci Sports*. 2015;25(Suppl 1):287-95.

19-Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc*. 2009;41(1):3-13.

20-Schmitt L, Regnard J, Parmentier AL, Mauny F, Mourot L, Coulmy N, Millet GP. Typology of "Fatigue" by Heart Rate Variability Analysis in Elite Nordic-skiers. *Int J Sports Med*. 2015;36(12):999-1007.

21-Merati G, Maggioni MA, Invernizzi PL, Ciapparelli C, Agnello L, Veicsteinas A, Castiglioni P. Autonomic modulations of heart rate variability and performances in short-distance elite swimmers. *Eur J Appli Physiol*. 2015;115(4):825-35

22-Buchheit M. Monitoring training status with HR measures: do all roads lead to Rome*? Front Physiol*. 2014;5:73.

23-Fortrat JO, Levrard T, Courcinous S, Victor J. Self-organization of blood pressure regulation: experimental evidence. *Front Physiol*. 2016;7:112.

24-Suarez-Arrones L, Torreño N, Requena B, Sáez De Villarreal E, Casamichana D, Barbero-Alvarez JC, Munguía-Izquierdo D. Match-play activity profile in professional soccer players during official games and the relationship between external and internal load. *J Sports Med Physic Fitness*. 2015;55(12):1417-22.

25-Arcos AL, Martínez-Santos R, Yanci J, Mendiguchia J, Méndez-Villanueva A. Negative associations between perceived training load, volume and changes in physical fitness in professional soccer players. *J Sports Sci Med*. 2015;14(2):394-401.

26-Buchheit M, Simpson MB, Al Haddad H, Bourdon PC, Mendez-Villanueva A. Monitoring changes in physical performance with heart rate measures in young soccer players. *Eur J Appl Physiol*. 2012;112(2):711-23. DOI: 10.1007/s00421-011-2014-0.

27-Mateo M, Blasco-Lafarga C, Martínez-Navarro I, Guzmán JF, Zabala M. Heart rate variability and pre-competitive anxiety in BMX discipline. *Eur J Appl Physiol*. 2012;112(1):113-23. DOI: 10.1007/s00421-011-1962-8.

28-Edmonds RC, Sinclair WH, Leicht AS. Effect of a training week on heart rate variability in elite youth rugby league players. *Int J of Sport Med*. 2013;34(12):1087-92. DOI: 10.1055/s-0033-1333720.

29-Cipryan L. Within-session stability of short-term heart rate variability measurement. *J Hum Kinet*. 2016;50(1): 85-92. DOI: 10.1515/hukin-2015-0146

30-Kowalewski MA, Urban M. Short- and long-term reproducibility of autonomic measures in supine and standing positions. *Clin Sci (Lond).* 2004;106(1):61-6.

31-Saboul D, Pialoux V, Hautier C. The impact of breathing on HRV measurements: implications for the longitudinal follow-up of athletes. *Eur J Sport Sci*. 2013;13(5):534-42. DOI: 10.1080/17461391.2013.767947.

Supplemental material

Table SI Difference between Standing to Supine position for heart rate (HR) and heart rate variability (HRV) indicators.

Indicators	Means±s	Percent
HR (bpm)	14.3±0.93	+ 20%
T (ms²)	2123.5±394.8	+37%
VLF (ms²)	1562.9±323.1	+ 56%
LF (ms²)	1102.1±187.4	+43%
LFnu (n.u)	27.0±2.4	+31%
HF (ms²)	-541.46±171.2	-114%
HFnu (n.u)	-26.98±2.4	-188%
LF/HF	7.43±1.1	+80%

Table SI, RMSSD: Root Mean Square of the Successive Differences; T: Total power; VLF: Very Low Frequencies; LF: Low Frequencies; HF: High Frequencies; nu is for normalization by T (n.u.: no unit). Percent = ((Standing-Supine)*100)/Standing

 CC BY NC ND

Conclusion

L'objet de notre travail était d'étudier la pertinence de l'utilisation de l'analyse de la Variabilité de la Fréquence Cardiaque dans des sports intermittents et en particulier le football. Nous avions émis l'hypothèse que la réactivité sympathique lors du passage en position debout serait un meilleur indicateur que les indicateurs parasympathiques utilisés dans les sports aérobies.

Comme suggéré par notre hypothèse, nos résultats montrent que le suivi de la VFC en position debout est mieux corrélé à la charge d'entraînement et à la perception de la forme qu'en position couché. Cependant, contrairement à notre hypothèse, nos résultats montrent que ce ne sont pas les indicateurs sympathiques qui permettent d'évaluer au mieux l'adaptation à la charge d'entraînement et la perception de la forme physique des joueurs. Effectivement, nos travaux identifient la variabilité globale de VFC (Total Power) en position debout comme étant l'indicateur le plus pertinent dans le monitoring des joueurs de football. Nous montrons également que les indicateurs parasympathiques, pertinents dans les sports d'endurance, le sont moins dans le suivi d'un sport intermittent. En effet, lors du suivi longitudinal des joueurs sur une période d'entrainement, aucun des indicateurs parasympathiques dans la position couché n'est statistiquement modifié au fil du temps. En revanche, une corrélation modérée entre l'indicateur temporel parasympathique RMSSD et la perception de la forme est observée alors que concernant l'indicateur parasympathique fréquentiel HF couché, aucune corrélation n'est observée et concernant sa version normalisée (HFnu) toujours en position couché, une corrélation modérée mais négative est observée.

L'indice temporel RMSSD au football

Durant la pré-saison, nous observons seulement une tendance à l'augmentation de LnRMSSD entre le début et la fin de la période de reprise. Cette tendance résulte probablement de l'effet combiné des vacances (association complexe d'un déconditionnement à l'exercice, d'une pratique aléatoire d'activités récréatives et d'un rythme de vie modifié) et de la première période d'entraînement basée sur un travail aérobie (Gamelin et coll., 2007). Aucune différence statistique n'est cependant observée entre les différentes mesures. Ces résultats sont contraires à ceux obtenus chez des footballeuses de première division universitaire américaine lors d'une pré-saison (Flatt et coll., 2016). Dans cette dernière étude, LnRMSSDweekly est largement corrélé à la charge d'entraînement (r=0.85) et la fatigue perçue (r=0.56). A la fois Plews et coll., (2013) et Le Meur et coll., (2013) ont montré que lors d'un suivi longitudinal d'athlètes d'endurance, la moyenne de RMSSD lors de mesures répétées au cours d'une semaine (au minimum 3) permettait d'avoir un meilleur reflet de l'adaptation à l'entraînement que lors d'une mesure isolée (1 par semaine). Cependant, chez des joueurs professionnels de futsal, LnRMSSDweekly n'est pas corrélé à la charge d'entraînement (Nakamura et coll., 2016) alors qu'une large variabilité inter-individuelle est observée en réponse à l'entraînement. Enfin chez des joueurs de futsal professionnels, lors de mesures avant et après un entraînement de 5 semaines, Ln RMSSD est significativement corrélé à la performance au test YoYo level 1 (test aérobie incrémental intermittent avec changement de directions) (De Freitas et coll., 2015). Nous observons également que RMSSD est modérément corrélé à la perception de la forme physique perçue des joueurs de football professionnel. Enfin, chez des joueurs de futsal de première division brésilienne, entre le début et la fin de la pré-saison, les améliorations au test YoYo level 1 s'accompagnent d'une amélioration de RMSSD alors qu'il reste inchangé durant la saison elle-même (Oliveira et coll., 2012).

En regard des différentes études utilisant RMSSD ou sa version transformée (ln RMSSD ou RMSSD weekly), les résultats divergent. Cette divergence peut être liée à la population : à savoir professionnels vs amateurs (Ravé et Fortrat, 2016 ; Knoepfli-Lenzin 2010) ; à la moyenne d'âge du groupe : jeune vs adulte (Buchheit et coll., 2012 ; Oliveira et coll., 2012); à la position d'enregistrement de VFC : couché vs assis vs debout (Flatt et Esco, 2016 ; Flatt et coll., 2016 ; Buchheit et coll., 2009) ; au genre de la population : masculin vs féminin (Nakamura et coll., 2016 vs Flatt et coll., 2016) ; à la période d'entraînement : pré-saison vs compétition (Ravé et Fortrat, 2016 ; Oliveira et coll., 2012) ; à la procédure d'enregistrement : le matin au repos vs après un effort sous maximal (Ravé et Fortrat, 2016 ; Thorpe et coll., 2016).

L'indicateur RMSSD est récemment recommandé au profil de l'analyse spectrale. Cependant RMSSD ne permet d'identifier qu'une fatigue globale (Schmitt et coll., 2015). L'analyse spectrale, quant à elle, permet d'identifier des types de fatigue en combinant les analyses en position couché et debout. (Schmitt et coll., 2015).

L'analyse spectrale dans la position debout

Nos résultats montrent l'intérêt de la position debout lors du suivi des footballeurs professionnels. Ils montrent également que l'analyse spectrale ne permet pas d'identifier clairement l'activité sympathique comme responsable des adaptations à l'entraînement et de la perception de la forme. A notre connaissance, peu d'études se sont intéressées au suivi des indicateurs fréquentiels de la VFC dans la position debout chez des sportifs professionnels d'activités intermittentes. En revanche, l'analyse spectrale dans la position debout a montré son intérêt dans le dépistage de la fatigue dans les activités aérobie (Le Meur et coll., 2013 ; Schmitt et coll., 2015 ; Mourot et coll., 2004).

Cependant, l'analyse spectrale comporte certaines limites. Comme nous avons pu le noter précédemment, l'interprétation de l'indicateur BF est très discutée (Eckberg, 1997 ; Malik, 1998). D'autre part, la reproductibilité des indicateurs spectraux est également discutée (Cyprian et Litchmannova, 2013). Alors que certains observent une bonne reproductibilité (Kowalewski et Urban, 2004 ; Farah et coll., 2016), d'autres études observent le contraire (Cyprian, 2016, Al Haddad et coll., 2009).

L'analyse spectrale n'est pas le meilleur outil pour estimer l'activité nerveuse sympathique cardiaque (Grassi et Esler, 1999). Elle évalue indirectement le SNA (Task Force, 1996). De plus, la vision de la régulation cardiovasculaire par le système nerveux autonome et la balance parasympathique/sympathique est une simplification qui ne reflète pas la complexité du système (Elghozi et Julien, 2007). Il est aujourd'hui clair qu'appréhender le système cardiovasculaire par le traditionnel concept d'homéostasie doit être revisité (Fortrat et coll., 2016).

Ainsi, l'analyse spectrale ne permet pas de vérifier notre hypothèse concernant la réactivité sympathique. Cependant nos résultats montrent que l'indicateur de la variabilité globale de VFC (T : Total power) dans la position debout est à l'heure actuelle, l'indicateur le plus pertinent pour le suivi des footballeurs professionnels.

Les spécificités du football professionnel

Un autre aspect de l'adaptation à la charge d'entraînement dans un sport comme le football doit être évoqué. La pratique du football implique une forte contribution du système neuromusculaire lors des sprints, accélérations, freinages… provoquant une fatigue neuromusculaire importante (Nédélec et coll., 2014). Celle-ci peut être causée notamment par une diminution du glycogène musculaire, une accumulation de métabolites musculaires, une altération de la conduction nerveuse, une diminution de l'excitabilité musculaire (Morh et coll., 2015 ; Girard et coll., 2011). La VFC n'est certainement pas le meilleur indicateur de la fatigue neuromusculaire. Ainsi, le monitoring de la VFC devrait être combiné à d'autres indicateurs, permettant notamment d'objectiver la fatigue neuromusculaire (e.g CMJ).

D'autre part, nous avons vu que la VFC était sensible à l'entraînement aérobie mais également à une charge d'entraînement élevée dans les sports d'endurance (Iellamo et coll., 2002). Au football, durant la pré-saison, la charge d'entraînement est plus importante que durant une période de compétition (Arcos et coll., 2015). En effet, durant la période de compétition, une équipe s'entraîne peu, environ 5H (Campos-Vazquez et coll., 2015). Cette charge d'entraînement n'est pas suffisante pour perturber le SNA (Da Silva et coll., 2016). Il n'est donc pas illogique d'observer peu de changement de la VFC durant des périodes de compétition (Thorpe et coll., 2015 ; Oliveira et coll., 2012) contrairement aux périodes de pré-saison (Flatt et coll., 2016).

Limites générales

Nos travaux comportent un certain nombre de limites. Tout d'abord, en fonction du poste occupé par le joueur, les contraintes physiques varient (Ingebrigtsen et coll., 2015). Ainsi, la charge de travail était inégale entre les joueurs. De plus, comme nous avons réalisé nos travaux « in situ » avec des joueurs de football professionnels, les différentes charges d'entraînement n'ont pas pu être modifiées à des fins expérimentales afin de provoquer un état de fatigue plus important. D'autre part, un groupe de joueurs professionnel présente des caractéristiques d'âge et d'années de pratique de l'activité différentes. Leurs capacités d'adaptation à l'entraînement étaient probablement différentes (Vesterinen et coll., 2015). Certains effets de l'entraînement ont donc pu être été masqués par l'hétérogénéité du groupe de joueurs.

Nous n'avons également pas vérifié l'absence de modification de la fréquence respiratoire soit par mesure directe soit au travers de la position du pic des hautes fréquences lors des enregistrements de la fréquence cardiaque alors que celle-ci peut modifier la VFC et notamment les indicateurs fréquentiels parasympathiques (Eckberg, 2003). Cependant, la fréquence respiratoire n'est pas supposée évoluer au fil des semaines (Manzi et coll., 2009), et de plus, une altération modérée de la fréquence respiratoire ne modifie pas les indicateurs spectraux (Saboul et coll., 2013).

Enfin, pour de raisons éthiques, nous n'avons pas contrôlé l'hygiène de vie des joueurs alors que cette dernière a un impact sur la VFC (Gonçalves et coll., 2015). L'alimentation, la qualité du sommeil, le niveau d'anxiété, la consommation d'alcool et de tabac sont autant d'éléments qui ont pu agir sur les indicateurs de la VFC lors de nos différentes études (Hansen et coll., 2014 ; Chalmers et coll., 2014 ; Matéo et coll., 2016 ; de Zombotti et coll., 2015 ; Santos et coll., 2016)

Perspectives

Première perspective

Nous avons noté au fil de nos travaux, que l'analyse spectrale ne permettait pas d'identifier clairement la branche du SNA responsable des adaptations à l'entraînement. Au repos, la VFC est principalement modulée par le SNA (Task force, 1996). L'analyse spectrale permet d'identifier les influences sympathiques et parasympathiques du SNA sur la VFC (Task Force, 1996). Cependant, l'analyse spectrale de la VFC comporte certaines limites. Outre celles liées à la signification physiologique des basses fréquences notamment en position couché (discordance dans la littérature), des limites existent sur le plan mathématique. L'analyse spectrale requiert la stationnarité et la périodicité du signal (Seely et Macklem, 2004). La stationnarité signifie que la moyenne et l'écart type du signal ne se modifie pas au cours du temps (Seely et Macklem, 2004). La périodicité signifie que le signal est composé de sinusoïdes, chacune dessinant, après analyse spectrale, un pic individualisé, appelé harmonique (Seely et Macklem, 2004). Or, d'une part un signal biologique n'est pas stationnaire et d'autre part la VFC n'est pas uniquement composée d'harmoniques. Quatre-vingts pourcents de la composition du signal de la VFC correspondent au bruit fractal (Yamamoto et Hughson, 1994). Ainsi, nous pouvons penser qu'il serait intéressant d'envisager l'étude de cette part importante du signal dite « fractale ». Nous pouvons penser que dans cette part importante du signal, se trouve un marqueur encore plus pertinent que ceux issus de l'analyse spectrale. De plus, combiner l'analyse des harmoniques à celle du bruit fractal pourrait permettre de discriminer plus précisément l'adaptation de chacune des branches du SNA à la pratique du football. La première perspective à notre travail est donc d'analyser à nouveau nos enregistrements de la FC battement par battement en appliquant les méthodes d'analyse de la composition fractale du signal.

Seconde perspective

L'étude de la pratique des clubs de football en Europe concernant le suivi de la VFC montre que les non utilisateurs de la VFC la jugent trop contraignante à mettre en place. Selon les recommandations de Task Force (1996), il faut 5 minutes d'enregistrement après une durée de stabilisation de 5 minutes. De plus, si l'on souhaite enregistrer la VFC dans deux positions différentes, il faut multiplier par deux la durée d'enregistrement. Réaliser, une à deux fois par semaine, des enregistrements de 10 à 20 minutes durant une saison qui dure 10 mois peut lasser les joueurs. De plus, les analyses de la VFC (temporelles, fréquentielles, géométriques) fournissent un grand nombre d'indicateurs. Dans la Task Force (1996) nous avons recensé 18 indicateurs issus des domaines temporels et fréquentiels auxquels nous pouvons ajouter 3 indicateurs issus de la méthode d'analyse géométrique de Poincaré (Tupplo et coll., 1996). Ces nombreux indicateurs peuvent complexifier l'interprétation et la compréhension de la VFC. La seconde perspective à notre travail est donc de rendre ces contraintes moins importantes en réduisant la durée des enregistrements et en identifiant l'indicateur le plus pertinent.

Troisième perspective

Nos travaux se sont intéressés à l'adaptation à la charge d'entrainement de l'ensemble du groupe de joueurs. Cette approche est indispensable afin de bénéficier des outils statistiques classiques. Elle permet une première identification de marqueurs potentiels de la mésadaptation à l'entrainement. La conséquence ultime d'une mésadaptation à la charge d'entraînement est la blessure intrinsèque. Cette dernière survient sans aucun contact avec un autre joueur au contraire de la blessure extrinsèque qui, survient lors d'un contact avec un autre joueur. Parmi les blessures intrinsèques, celles dites musculaires ont un impact négatif sur le classement des clubs de football européens (Hägglund et coll., 2013). La blessure musculaire est favorisée par des facteurs prédisposant comme l'âge, une blessure antérieure, un déficit de force musculaire (McCall et coll., 2015). Une équipe de 25 joueurs comptabilise en moyenne, 15 blessures musculaires par saison (Ekstrand et coll., 2011). Elle semble théoriquement prévisible chez un joueur fatigué et/ou mal adapté à la charge d'entrainement qui lui est demandée. Cependant, elle demeure en pratique difficile à anticiper et les outils actuels sont insuffisants pour sa prévention. Récemment, Gisselman et coll., (2016) se sont interrogés sur le potentiel de la VFC à prédire la survenue des blessures intrinsèques. Au cours des années qu'ont nécessité nos travaux, nous avons compilé des données de blessures musculaires. L'étape suivante de notre travail consistera donc dans la démonstration du caractère prédictif du marqueur préalablement identifié (Total Power en position debout) au niveau individuel et en particulier dans la prévision de la blessure intrinsèque. Une telle approche nécessite le suivi de joueurs sur le long terme tout en collectant les évènements traumatiques de chacun. Notre troisième perspective serait donc maintenant d'analyser ces données pour tenter de répondre à la question posée par Gisselman et coll., (2016).

Bibliographie générale

Abad C, Kobal R, Kitamura K, Gil S, Pereira L, Loturco I, Nakamura F. Heart rate variability in elite sprinters: effects of gender and body position. *Clinical Physiology and Functional Imaging*. 2015; in press. doi: 10.1111/cpf.12331

Al Haddad H, Laursen PB, Chollet D, Ahmaidi S, Buchheit M. Reliability of resting and postexercise heart rate measures. *International Journal of Sports Medicine*. 2011; 32(8): 598-605. doi: 10.1055/s-0031-1275356

Arcos AL, Martínez-Santos R, Yanci J, Mendiguchia J, Méndez-Villanueva A. Negative associations between perceived training load, volume and changes in physical fitness in professional soccer players. *Journal of Sports Science and Medicine*. 2015; 14(2): 394-401.

Atlaoui D, Pichot V, Lacoste L, Barale F, Lacour JR, Chatard JC. Heart rate variability, training variation and performance in elite swimmers. *International Journal of Sports Medicine*. 2007; 28: 394-400.

Aubert AE, Ramaekers D, Cuche Y, Leysens R, Ector H, Van de Werf F. Effect of long-term physical training on heart rate variability. *IEEE Computers in Cardiology*. 1996; 16: 17-20.

Aubert AE, Beckers F, Ramaekers D. Short-term heart rate variability in young athletes. *Journal of Cardiology*. 2001; 37(Suppl 1): 85-88.

Aubert AE, Seps B, Beckers F. Heart rate variability in athletes. *Sports Medicine*. 2003; 33(12): 889-919.

Barbosa MP, Da Silva NT, De Azevedo FM, Pastre CM, Vanderlei LC. Comparison of Polar® RS800G3™ heart rate monitor with Polar® S810i™ and electrocardiogram to obtain the series of RR intervals and analysis of heart rate variability at rest. *Clinical Physiology and Functional Imaging*. 2016; 36(2): 112-117. doi: 10.1111/cpf.12203

Buchheit M, Al Haddad H, Laursen PB, Ahmaidi S. Effect of body posture on postexercise parasympathetic reactivation in men. *Experimental Physiology.* 2009; 94(7): 795-804. doi:10.1113/expphysiol.2009.048041

Buchheit M, Chivot A, Parouty J, Mercier D, Al Haddad H, Laursen PB, Ahmaidi S. Monitoring endurance running performance using cardiac parasympathetic function. *European Journal of Applied Physiology*. 2010; 108(6): 1153-1167. doi: 10.1007/s00421-009-1317-x

Buchheit M, Simpson MB, Al Haddad H, Bourdon PC, Mendez-Villanueva A. Monitoring changes in physical performance with heart rate measures in young soccer players. *European Journal of Applied Physiology*. 2012; 112(2): 711-23. doi: 10.1007/s00421-011-2014-0

Buchheit, M. Monitoring training status with HR measures: do all roads lead to Rome? *Frontiers in Physiology*. 2014; (5): 73. doi: 10.3389/fphys.2014.00073

Campos-Vazquez M, Mendez-Villanueva A, Gonzalez-Jurado JA, León-Prados JA, Santalla A, Suarez-Arrones L. Relationships between rating-of-perceived-exertion- and heart-rate-derived internal training load in professional soccer players: a comparison of on-field integrated training sessions. *International Journal of Sports Physiology and Performance.* 2015; 10(5): 587-592. doi: 10.1123/ijspp.2014-0294

Carling C, McCall A, Le Gall F, Dupont G. The impact of short periods of match congestion on injury risk and patterns in an elite football club. *British Journal of Sports Medicine*. 2016; 50(12): 764-768. doi: 10.1136/bjsports-2015-095501

Carter JB, Banister EW, Blaber AP. The effect of age and gender on heart rate variability after endurance training. *Medicine & Science in Sports Exercise*. 2003; 35(8): 1333-1340.

Chalmers JA, Quintana DS, Abbott MJ, Kemp AH. Anxiety disorders are associated with reduced heart rate variability: a meta-analysis. *Frontiers in Psychiatry*. 2014; 5: 80. doi: 10.3389/fpsyt.2014.00080

Cipryan L. Within-session stability of short-term heart rate variability measurement. *Journal of Human Kinetics*. 2016; 50(1): 85-92. doi: 10.1515/hukin-2015-0146

Cottin F, Médigue C, Lopes P, Leprêtre PM, Heubert R, Billat V. Ventilatory thresholds assessment from heart rate variability during an incremental exhaustive running test. *International Journal of Sports Medicine*. 2007; 28(4): 287-294.

da Silva VP, de Oliveira NA, Silveira H, Mello RG, Deslandes AC. Heart rate variability indexes as a marker of chronic adaptation in athletes: a systematic review. *Annals of Noninvasive Electrocardiology.* 2015; 20(2): 108-118. doi: 10.1111/anec.12237

De Freitas VH, Pereira LA, De Souza EA, Leicht AS, Bertollo M, Nakamura FY. Sensitivity of the Yo-Yo intermittent recovery test and cardiac autonomic responses to training in futsal players. *International Journal of Sports Physiology and Performance.* 2015; 10(5): 553-8.

de Zambotti M, Willoughby AR, Baker FC, Sugarbaker DS, Colrain IM. Cardiac autonomic function during sleep: effects of alcohol dependence and evidence of partial recovery with abstinence. *Alcohol*. 2015; 49(4): 409-415. doi: 10.1016/j.alcohol.2014.07.023

Di Salvo V, Baron R, Tschan H, Calderon Montero FJ, Bachl N, Pigozzi F. Performance characteristics according to playing position in elite soccer. *International Journal of Sports Medicine.* 2007; 28(3): 222-227.

Di Salvo V, Pigozzi F, González-Haro C, Laughlin MS, De Witt JK. Match performance comparison in top English soccer leagues. *International Journal of Sports Medicine*. 2013; 34(6): 526-532. doi: 10.1055/s-0032-1327660

Dong, JG. The role of heart rate variability in sports physiology. *Experimental and Therapeutic Medicine.* 2016; 11(5): 1531-1536.

Eckberg DL. Sympathovagal balance: a critical appraisal. *Circulation*. 1997; 96(9): 3224-3232.

Eckberg DL. The human respiratory gate. *The Journal of Physiology*. 2003; 15; 548(Pt 2): 339-352.

Edwards RH. Biochemical bases of fatigue in exercise performance: Catastrophe theory of muscular fatigue*. In Biochemistry of exercise. Edition Champaign, IL: Human Kinetics*. 1983; pp 1-28.

Elghozi JL, Julien C. Sympathetic control of short-term heart rate variability and its pharmacological modulation. *Fundamental & Clinical Pharmacology*. 2007; 21(4): 337-347

Ehrmann FE, Duncan CS, Sindhusake D, Franzsen WN, Greene DA. GPS and injury prevention in professional soccer. *The Journal of Strength Conditioning and Research.* 2016; 30(2): 360-367. doi: 10.1519/JSC.0000000000001093

Ekstrand J, Hägglund M, Waldén M. Epidemiology of muscle injuries in professional football (soccer). *The American Journal of Sports Medicine.* 2011; 39(6): 1226-1132. doi: 10.1177/0363546510395879

Esco MR, Flatt AA, Nakamura FY. Initial weekly HRV response is related to the prospective change in VO2max in female soccer players. *International Journal of Sports Medicine*. 2016; 37(6): 436-441. doi: 10.1055/s-0035-1569342.

Farah BQ, Lima AH, Cavalcante BR, de Oliveira LM, Brito AL, de Barros MV, Ritti-Dias RM. Intra-individuals and inter- and intra-observer reliability of short-term heart rate variability in adolescents. *Clinical Physiology and Functional Imaging*. 2016; 36(1): 33-39. doi: 10.1111/cpf.12190

Filliau C, Younes M, Blanchard AL, Piscione J, Van de Louw A, Seguret C, Israel J, Cottin F. Effect of "Touch Rugby" training on the cardiovascular autonomic control in sedentary subjects. *International Journal of Sports Medicine*. 2015; 36(7): 567-572. doi: 10.1055/s-0034-1398648

Flatt AA, Esco MR. Evaluating individual training adaptation with smartphone-derived heart rate variability in a collegiate female soccer team. The Journal of Strength & Conditioning Research. 2016; 30(2): 378-385. doi: 10.1519/JSC.0000000000001095

Flatt AA, Esco MR, Nakamura FY. Individual heart rate variability responses to preseason training in high level female soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research.* 2016; in press.

Fortrat JO. Complexité de la dynamique cardio-vasculaire : Etude lors de déplétions volémiques modérées. *Thèse universitaire*. 1998.

Fortrat JO, Levrard T, Courcinous S, Victor J. Self-organization of blood pressure regulation: experimental evidence. *Frontiers in Physiology*. 2016; 7: 112.

Foster C, Florhaug JA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LA, Parker S, Doleshal P, Dodge C. A new approach to monitoring exercise training. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 2001; 15(1): 109-115.

Fowler P, Duffield R, Howle K, Waterson A, Vaile J. Effects of northbound long-haul international air travel on sleep quantity and subjective jet lag and wellness in professional Australian soccer players. International *Journal of Sports Physiology and Performance*. 2015; 10(5): 648-654. doi: 10.1123/ijspp.2014-0490

Gamelin FX, Berthoin S, Sayah H, Libersa C, Bosquet L. Effect of training and detraining on heart rate variability in healthy young men. *International Journal of Sports Medicine*. 2007; 28(7): 564-570.

Garet M, Tournaire N, Roche F, Laurent R, Lacour JR, Barthélémy JC, Pichot V. Individual interdependence between nocturnal ANS activity and performance in swimmers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2004; 36(12): 2112-2118.

Gaudino P, Iaia FM, Alberti G, Strudwick AJ, Atkinson G, Gregson W. Monitoring training in elite soccer players: systematic bias between running speed and metabolic power data. *International Journal of Sports Medicine.* 2013; 34(11): 963-968. doi: 10.1055/s-0033-1337943

Girard O, Mendez-Villanueva A, Bishop D. Repeated-sprint ability - part I: factors contributing to fatigue. *Sports Medicine*. 2011; 41(8): 673-694. doi: 10.2165/11590550-000000000-00000

Gisselman AS, Baxter GD, Wright A, Hegedus E, Tumilty S. Musculoskeletal overuse injuries and heart rate variability: Is there a link? *Medical Hypotheses*. 2016; 87: 1-7. doi: 10.1016/j.mehy.2015.12.003

Goldstein DS, Bentho O, Park MY, Sharabi Y. Low-frequency power of heart rate variability is not a measure of cardiac sympathetic tone but may be a measure of modulation of cardiac autonomic outflows by baroreflexes. *Experimental Physiology*. 2011; 96(12): 1255-1261. doi: 10.1113/expphysiol.2010.056259

Gonçalves TR, Farinatti PT, Gurgel JL, da Silva Soares PP. Correlation between cardiac autonomic modulation in response to orthostatic stress and indicators of quality of life, physical capacity, and physical activity in healthy individuals. *The Journal of Strength & Conditioning Research.* 2015; 29: 1415–1421. doi:10.1519/JSC.0000000000000769

Grassi G, Esler M. How to assess sympathetic activity in humans. *Journal of Hypertension*. 1999; 17(6): 719-734.

Hägglund M, Waldén M, Magnusson H, Kristenson K, Bengtsson H, Ekstrand J. Injuries affect team performance negatively in professional football: an 11-year follow-up of the UEFA Champions League injury study. *British Journal of Sports Medicine*. 2013; 47(12): 738-742. doi: 10.1136/bjsports-2013-092215

Halson SL. Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Medicine.* 2014; 44 (Suppl2): S139-147. doi: 10.1007/s40279-014-0253-z

Hansen AL, Dahl L, Olson G, Thornton D, Graff IE, Frøyland L, Thayer JF, Pallesen S. Fish consumption, sleep, daily functioning, and heart rate variability. *Journal of Clinical Sleep Medicine*. 2014; 10: 567-575. doi: 10.5664/jcsm.3714

Hedelin R, Kenttä G, Wiklund U, Bjerle P, Henriksson-Larsén K. Short-term overtraining: effects on performance, circulatory responses, and heart rate variability. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2000; 32(8): 1480-1484.

Iellamo F, Legramante JM, Pigozzi F, Spataro A, Norbiato G, Lucini D, Pagani M. Conversion from vagal to sympathetic predominance with strenuous training in high-performance world class athletes. *Circulation*. 2002; 105(23): 2719-2724.

Ingebrigtsen J, Dalen T, Hjelde GH, Drust B, Wisløff U. Acceleration and sprint profiles of a professional elite football team in match play. *European Journal of Sport Science.* 2015; 15(2): 101-110. doi: 10.1080/17461391.2014.933879

Jansen AS, Nguyen XV, Karpitskiy V, Mettenleiter TC, Loewy AD. Central command neurons of the sympathetic nervous system: basis of the fight-or-flight response. *Science*. 1995, 27; 270(5236): 644-646.

Kiviniemi AM, Hautala AJ, Kinnunen H, Tulppo MP. Endurance training guided individually by daily heart rate variability measurements. European Journal of Applied Physiology. 2007; 101(6): 743-751.

Knoepfli-Lenzin C, Sennhauser C, Toigo M, Boutellier U, Bangsbo J, Krustrup P, Junge A, Dvorak J. Effects of a 12-week intervention period with football and running for habitually active men with mild hypertension. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports. 2010; 20(Suppl 1): 72-9. doi: 10.1111/j.1600-0838.2009.01089.x

Komi PV. Stretch-shortening cycle: a powerful model to study normal and fatigued muscle. *Journal of Biomechanics.* 2000; 33: 1197–1206. doi:10.1016/S0021-9290(00)00064-6

Kowalewski MA, Urban M. Short- and long-term reproducibility of autonomic measures in supine and standing positions. *Clinical Science (London).* 2004; 106(1): 61-6.

Lago-Peñas C. The role of situational variables in analysing physical performance in soccer. *Journal of Human Kinetics.* 2012; 35: 89-95. doi: 10.2478/v10078-012-0082-9

Le Meur Y, Pichon A, Schaal K, Schmitt L, Louis J, Gueneron J, Vidal PP, Hausswirth C. Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes. *Medicine & Science in Sports Exercise.* 2013; 45(11): 2061-2071. doi: 10.1249/MSS.0b013e3182980125

Malik M. Sympathovagal balance: a critical appraisal. *Circulation*. 1998; 98(23): 2643-2644.

Mallo J, Mena E, Nevado F, Paredes V. Physical demands of top-class soccer friendly matches in relation to a playing position using global positioning system technology. *Journal of human kinetics*. 2015; 47: 179-188. doi: 10.1515/hukin-2015-0073

Manzi V, Castagna C, Padua E, Lombardo M, D'Ottavio S, Massaro M, Volterrani M, Iellamo F. Dose-response relationship of autonomic nervous system responses to individualized training impulse in marathon runners. *American Journal of Physiology*. 2009; 296: H1733-1740. doi: 10.1152/ajpheart.00054.2009

Mateo M, Blasco-Lafarga C, Martínez-Navarro I, Guzmán JF, Zabala M. Heart rate variability and pre-competitive anxiety in BMX discipline. *European Journal of Applied Physiology*. 2012; 112(1): 113-123. doi: 10.1007/s00421-011-1962-8

McCall A, Carling C, Davison M, Nedelec M, Le Gall F, Berthoin S, Dupont G. Injury risk factors, screening tests and preventative strategies: a systematic review of the evidence that underpins the perceptions and practices of 44 football (soccer) teams from various premier leagues. *British Journal of Sports Medicine*. 2015; 49(9): 583-589. doi: 10.1136/bjsports-2014-094104

Meeusen R, Watson P, Hasegawa H, Roelands B, Piacentini MF Brain neurotransmitters in fatigue and overtraining. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism*. 2007; 32(5): 857-864.

Meeusen R, Duclos M, Foster C, Fry A, Gleeson M, Nieman D, Raglin J, Rietjens G, Steinacker J, Urhausen A. 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. *European College of Sport Science, American College of Sports.* 2013*;* 45(1): 186-205.

Melanson EL, Freedson PS. The effect of endurance training on resting heart rate variability in sedentary adult males. *European Journal of Applied Physiology*. 2001; 85(5): 442-449.

Moak JP, Goldstein DS, Eldadah BA, Saleem A, Holmes C, Pechnik S, Sharabi Y. Supine low-frequency power of heart rate variability reflects baroreflex function, not cardiac sympathetic innervation. *Cleveland Clinic Journal of Medicine*. 2009; 76(Suppl2): S51-59. doi: 10.3949/ccjm.76.s2.11

Mohr M, Krustrup P, Bangsbo J. Fatigue in soccer: a brief review. *Journal of Sports Sciences.* 2005; 23(6): 593-599.

Mohr M, Draganidis D, Chatzinikolaou A, Barbero-Álvarez JC, Castagna C, Douroudos I, Avloniti A, Margeli A, Papassotiriou I, Flouris AD, Jamurtas AZ, Krustrup P, Fatouros IG. Muscle damage, inflammatory, immune and performance responses to three football games in 1 week in competitive male players. *European Journal of Applied Physiology*. 2015; 116(1): 179-193. doi: 10.1007/s00421-015-3245-2

Mourot L, Bouhaddi M, Tordi N, Rouillon JD, Regnard J. Short- and long-term effects of a single bout of exercise on heart rate variability: comparison between constant and interval training exercises. *European Journal of Applied Physiology*. 2004; 92: 508-517.

Nakamura FY, Flatt AA, Pereira LA, Ramirez-Campillo R, Loturco I, Esco M. Ultra-short-term heart rate variability is sensitive to training effects in team sports players. *Journal of Sports Science and Medicine*. 2015; 14(3): 602-605.

Nakamura FY, Pereira LA, Rabelo FN, Flatt AA, Esco MR, Bertollo M, Loturco, I. Monitoring weekly heart rate variability in futsal players during the preseason: the importance of maintaining high vagal activity. *Journal of Sports Sciences.* 2016; 23: 1-7.

Nédélec M, McCall A, Carling C, Legall F, Berthoin S, Dupont G. Recovery in soccer: part I - post-match fatigue and time course of recovery. *Sports Medicine.* 2012; 42(12): 997-1015. doi: 10.2165/11635270-000000000-00000

Nédélec M, McCall A, Carling C, Legall F, Berthoin S, Dupont G. The influence of soccer playing actions on the recovery kinetics after a soccer match. *The Journal of Strength and Conditioning Research*. 2014; 28(6): 1517-1523. doi: 10.1519/JSC.0000000000000293

Oliveira RS, Leicht AS, Bishop D, Barbero-Álvarez JC, Nakamura FY. Seasonal changes in physical performance and heart rate variability in high level futsal players. *International Journal of Sports Medicine*. 2012; 34: 424-430. doi: 10.1055/s-0032-1323720

Olufsen MS, Alston AV, Tran HT, Ottesen JT, Novak V. Modeling heart rate regulation-part I: sit-to-stand versus head-up tilt. *Cardiovascular Engeering*. 2008; 8: 73-87.

Perini R, Orizio C, Milesi S, Biancardi L, Baselli G, Veicsteinas A. Body position affects the power spectrum of heart rate variability during dynamic exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology.* 1993; 66(3): 207-213.

Plews DJ, Laursen PB, Stanley J, Kilding AE, Buchheit M. Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: opening the door to effective monitoring. *Sports Medicine*. 2013; 43(3): 773-781.

Plews DJ, Laursen PB, Buchheit M. Day-to-day Heart Rate Variability (HRV) recordings in world champion rowers: appreciating unique athlete characteristics. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 2016; 13: 1-19.

Pichot V, Roche F, Gaspoz JM, Enjolras F, Antoniadis A, Minini P, Costes F, Busso T, Lacour JR, Barthélémy JC. Relation between heart rate variability and training load in middle-distance runners. Medicine & Science in Sports & Exercise. 2000; 32(10): 1729-1736.

Plowman SA, Smith DL. Physiological effects of Overtraining and Detraining. *Sports-specific Rehabilitation. Elsevier, London.* 2007; 105-121.

Rampinini E, Coutts AJ, Castagna C, Sassi R, Impellizzeri FM. Variation in top level soccer match performance. *International Journal of Sports Medicine*. 2007; 28(12): 1018-1024.

Randers MB, Mujika I, Hewitt A, Santisteban J, Bischoff R, Solano R, Zubillaga A, Peltola E, Krustrup P, Mohr M. Application of four different football match analysis systems: a comparative study. *Journal of Sports Sciences.* 2010; 28(2): 171-182. doi: 10.1080/02640410903428525

Ravé G, Fortrat JO. Heart rate variability in the standing position reflects training adaptation in professional soccer players. *European Journal of Applied Physiology*. 2016; in press

Rompelman O. Accuracy aspects in ECG preprocessing fort he study of heart rate variability. *In Kitney RI, Rompelman eds, The beat to beat investigation of cardiovascular function. Oxford University Press.* 1986; 103-125.

Saboul D, Pialoux V, Hautier C. The impact of breathing on HRV measurements: implications for the longitudinal follow-up of athletes. *European Journal of Sport Science*. 2013; 13(5): 534-542. doi: 10.1080/17461391.2013.767947

Santos AP, Ramos D, Oliveira GM, Santos AA, Freire AP, Ito JT, Fernandes RP, Vanderlei LC, Ramos EM. Influence of smoking consumption and nicotine dependence degree in cardiac autonomic modulation. *Arquivos Brasilieros de Cardiologia*. 2016; 106(6): 510-518. doi: 10.5935/abc.20160063

Seely AJ, Macklem PT. Complex systems and the technology of variability analysis. *Critical Care*. 2004; 8(6): R367-384

Schmitt L, Hellard P, Millet GP, Roels B, Richalet JP, Fouillot JP. Heart rate variability and performance at two different altitudes in well-trained swimmers. *International Journal of Sports Medicine*. 2006; 27(3): 226-231.

Schmitt L, Regnard J, Millet GP. Monitoring fatigue status with HRV measures in elite athletes: An avenue beyond RMSSD? *Frontiers in Physioogyl*. 2015; 6: 343.

Schmitt L, Regnard J, Parmentier AL, Mauny F, Mourot L, Coulmy N, Millet GP. Typology of "fatigue" by heart rate variability analysis in elite nordic-skiers. International Journal of Sports Medicine. 2015; 36(12): 999-1007. doi: 10.1055/s-0035-1548885

Sharma P, Paudel BH, Singh PN, Limbu P. Heart rate variability: Response to graded head up tilt in healthy men. Kathmandu University Medical Journal. 2009; 7(27): 252-257.

Shepherd JT, Mancia G. Reflex control of the human cardiovascular system. *Review of Physiology, Biochemestry and Pharmacology*. 1986; 105:1-99.

Shoemaker JK, Hogeman CS, Khan M, Kimmerly DS, Sinoway LI. Gender affects sympathetic and hemodynamic response to postural stress. *American Journal of Physiology Heart and Circulatory Physiology*. 2001; 281(5): H2028-2035.

Stanley J, Peake JM, Buchheit M. Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: implications for training prescription. *Sports Medicine.* 2013; 43(12): 1259-1277. doi: 10.1007/s40279-013-0083-4

Stølen T, Chamari K, Castagna C, Wisløff U. Physiology of soccer: an update. *Sports Medicine.* 2005; 35(6): 501-536.

Sugihara G, May RM. Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series. *Nature.* 1990; 344: 734-741.

Task Force of the European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*. 1996; 17(3): 354–381.

Thorpe RT, Strudwick AJ, Buchheit M, Atkinson G, Drust B, Gregson W. Monitoring fatigue during the in-season competitive phase in elite soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance.* 2015; 10(8), 958-964. doi: 10.1123/ijspp.2015-0004

Thorpe RT, Strudwick AJ, Buchheit M, Atkinson G, Drust B, Gregson W. The tracking of morning fatigue status across in-Season training weeks in elite soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 2016; in press

Tulppo MP, Makikallio TH, Takala TE, Seppanen T, Huikuri HV. Quantitative beat-to-beat analysis of heart rate dynamics during exercise. *American Journal of Physiology.* 1996; 271(1 Pt 2): 244-252.

Vanderlei LC, Pastre CM, Hoshi RA, Carvalho TD, Godoy MF. Basic notions of heart rate variability and its clinical applicability. *Revista Brasileira de Cirurgia Cardiovascular*. 2009; 24(2): 205-217.

Vesterinen V, Häkkinen K, Hynynen E, Mikkola J, Hokka L, Nummela A. Heart rate variability in prediction of individual adaptation to endurance training in recreational endurance runners. *Scandinavian Journal Medicine Science in Sports*. 2013; 23(2): 171-180. doi: 10.1111/j.1600-0838.2011.01365.x

Vesterinen V, Häkkinen K, Laine T, Hynynen E, Mikkola J, Nummela A. Predictors of individual adaptation to high-volume or high-intensity endurance training in recreational endurance runners. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 2015; in press. doi: 10.1111/sms.12530

Vesterinen V, Nummela A, Heikura I, Laine T, Hynynen E, Botella J, Häkkinen K. Individual endurance training prescription with heart rate variability. Medicine & Science in Sports & Exercise. 2016; 48(7): 1347-1354. doi: 10.1249/MSS.0000000000000910

Weippert M, Kumar M, Kreuzfeld S, Arndt D, Rieger A, Stoll R. Comparison of three mobile devices for measuring R-R intervals and heart rate variability: Polar S810i, Suunto t6 and an ambulatory ECG system. *European Journal of Applied Physiology*. 2010; 109(4): 779-786. doi: 10.1007/s00421-010-1415-9

Yamamoto Y, Hughson RL. On the fractal nature of heart rate variability in humans: effects of data length and beta-adrenergic blockade. *American Journal of Physiology*. 1994; 266: R40-49.

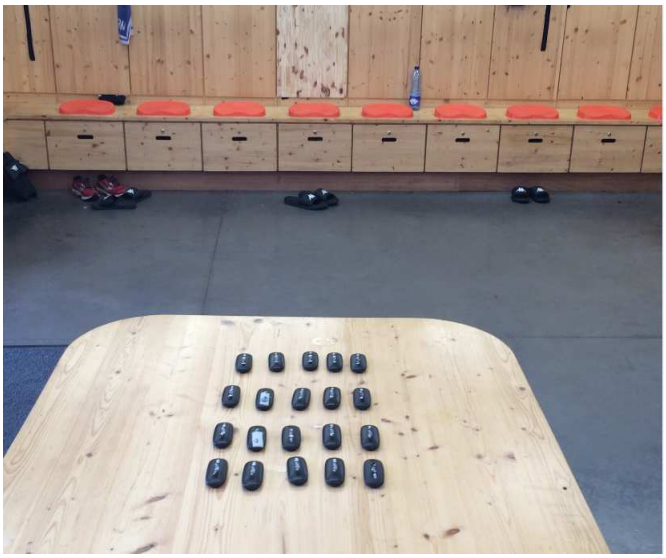
Yamamoto Y, Hughson RL. Extracting fractal components from timeseries. *Physica*. 1995; (D68): 250-264.

Annexes

Illustration de la procédure du monitoring des joueurs du Stade Lavallois MFC au cours des différentes études.

Etape n°1 Arrivée des joueurs à jeun au club entre 8H20 et 8H25

Etape n°2 Chaque joueur récupère son émetteur Polar Team 2.



Mise à disposition des émetteurs PolarTeam2® dans le vestiaire des joueurs

Etape N°3 8H30 début de l'enregistrement en position couchée dans le silence, les joueurs ne bougent pas et la fréquence respiratoire est libre.

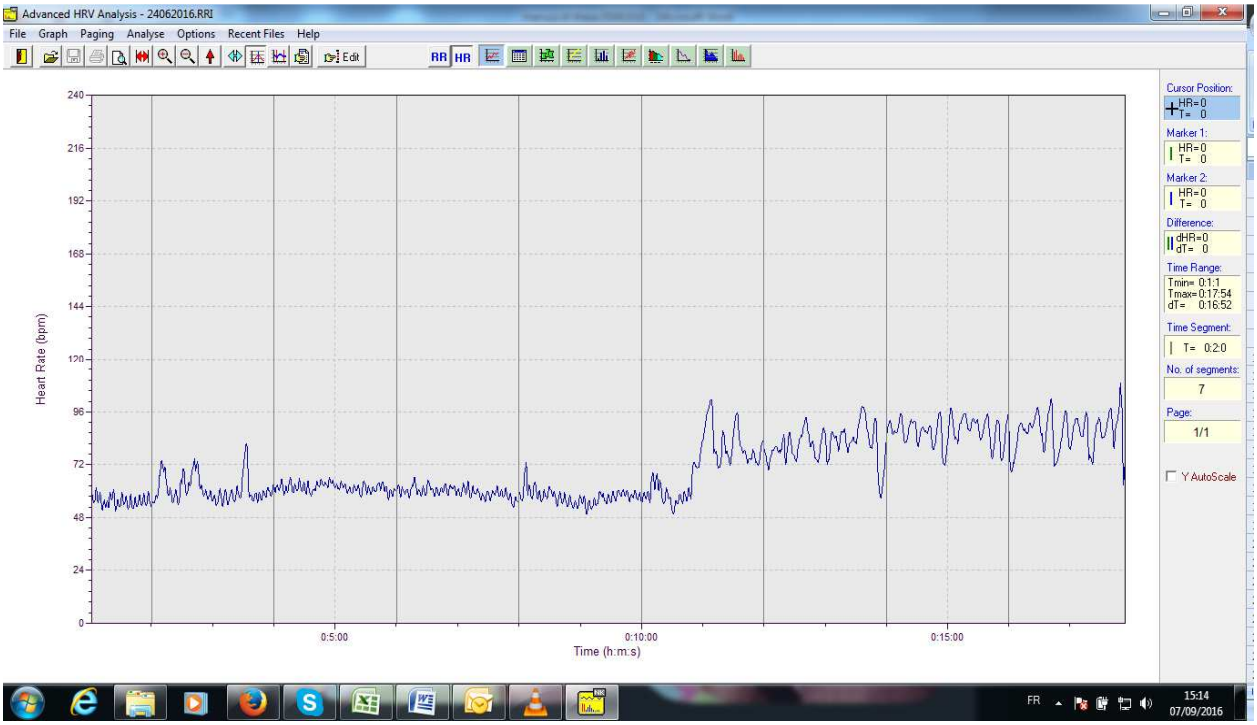
Le groupe de joueurs en position couché

Etape n°4 8H40 début de l'enregistrement en position debout

Le groupe de joueurs en position debout

Etape n°5 8H47 fin du test, restitution des émetteurs

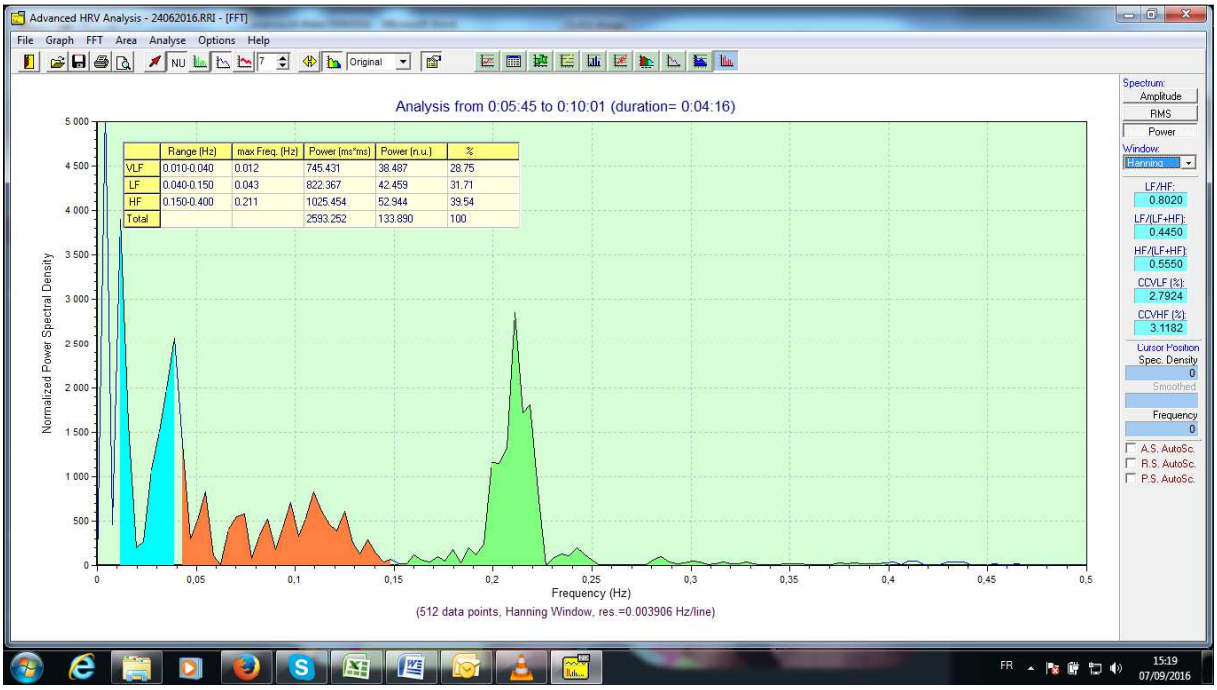
Etape n°6 Traitement des enregistrements par Nevrokard® (compter 45 minutes pour 20 joueurs)



Copie d'écran d'un stand test sur le logiciel Nevrokard® montrant le tachogramme d'un joueur et donc l'évolution de sa fréquence cardiaque lors d'un stand test. Le début de l'enregistrement correspond à la position couché (jusqu'à 10 min environ, échelle des x), la fin à la position debout. La variabilité de la fréquence cardiaque est évidente sur ce type d'enregistrement. Cette figure illustre aussi la modification de cette variabilité entre la position couché et debout.

A) Couché

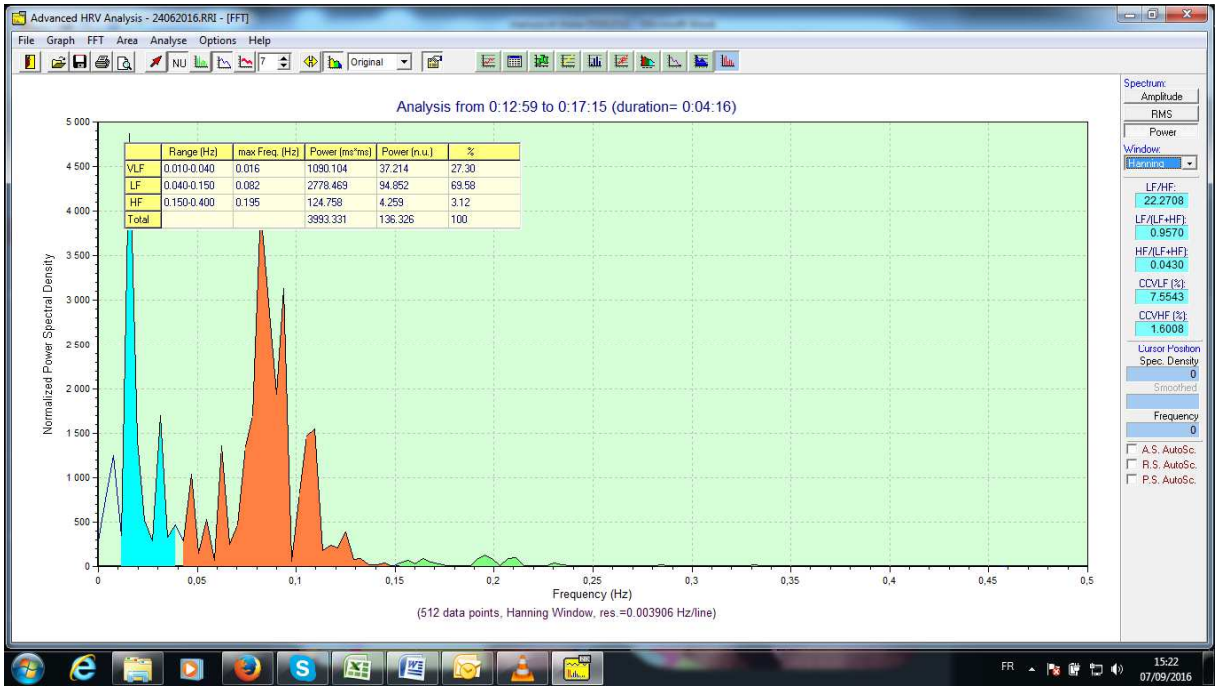
Copie d'écran des indicateurs temporels par le logiciel Nevrokard® en position couché. La fréquence cardiaque est indiquée dans le petit ovale et le RMSSD, le marqueur temporel le plus utilisé est indiqué dans le grand ovale.



Copie d'écran d'une analyse spectrale en position couchée par le logiciel Nevrokard®. En Turquoise, les très basses fréquences, en rouge, les basses fréquences et en vert les hautes fréquences.

B) Debout

Copie d'écran des indicateurs temporels en position debout. La fréquence cardiaque moyenne est entourée.



Copie d'écran d'une analyse spectrale en position debout. En turquoise, les très basses fréquences, en rouge, les basses fréquences et en vert les hautes fréquences.

RÉSUMÉ

La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) est une méthode simple et non invasive permettant d'évaluer l'influence du système nerveux autonome (SNA) sur la fonction cardiaque. Le SNA est constitué de deux branches aux actions antagonistes. Celle dite sympathique est cardio-activatrice et celle dite parasympathique est cardio-modératrice. Très étudiés dans les sports d'endurance, les indicateurs parasympathiques de la VFC issus de l'analyse spectrale (Hautes Fréquences, HF) et temporelle (Root Mean Square of the Successive Differences, RMSSD) s'y avèrent pertinents pour le suivi d'entraînement. Dans un sport comme le football, le grand nombre de matchs durant la saison rend essentiel l'équilibre entre entraînement et récupération. Dans ce contexte, l'utilisation de la VFC peut aider les entraîneurs à optimiser l'entraînement et donc la performance physique des joueurs. Beaucoup de clubs européens utilisent le marqueur recommandé dans les sports d'endurance (RMSSD). Or le football, sport intermittent, implique théoriquement plus des mécanismes sympathiques (réactivité) que parasympathiques. Effectivement, nos travaux, chez des footballeurs professionnels, montrent que RMSSD n'est pas l'indicateur le plus pertinent, que ce soit pour le suivi d'entraînement lors d'une pré-saison, que pour prédire la perception de la forme physique en compétition. L'analyse spectrale lors d'enregistrements dans la position debout se révèle logiquement plus adaptée puisque cette position met en œuvre le système sympathique. Cependant, cette analyse ne permet pas d'identifier clairement les influences du SNA. De plus, nos résultats remettent en question l'attribution à l'influence parasympathique de RMSSD. En conclusion, la VFC en position debout est un outil pertinent dans la pratique d'un sport intermittent à haut niveau.

mots-clés : analyse spectrale, athlète, entraînement, parasympathique, performance, RMSSD, sport d'équipe, sport intermittent, sympathique, système nerveux autonome

ABSTRACT

Heart Rate Variability (HRV) is a simple and noninvasive tool to assess autonomic nervous system (ANS) influences to the heart. ANS is made of two opposing effect branches. The sympathetic one activates the heart while the parasympathetic one slows it down. Parasympathetic indicators derived from HRV are well studied in the context of endurance sports. They could be determined by means of time or spectral analysis (Root mean Square of the Successive Difference, RMSSD, and High Frequency, HF, respectively). They provide key information to monitor training adaptation. In the case of soccer, a balance between training charge and recovery is necessary because of the numerous games during a whole season. HRV is supposed to assist coaches in order to optimize training and thus players' physical performance. Many European soccer clubs use the indicator recommended for endurance sports (RMSSD). However, soccer is an intermittent sport that involves theoretically more the sympathetic nervous system (reactivity) than the parasympathetic one. Our studies on professional soccer players show that RMSSD is not the most relevant indicator, neither to monitor training during a pre-season nor to predict fitness perception during competition. We demonstrated that HRV spectral analysis performed while players are standing is more appropriate since this position involved the sympathetic nervous system. However, spectral analysis failed to identify sympathetic nervous system as the key determinant of soccer training adaptation. In addition, our results challenged the link between RMSSD and the parasympathetic nervous system. In conclusion, spectral analysis of HRV performed in the standing position is a useful tool in the case of intermittent high level sports.

keywords : athlete, autonomic nervous system, intermittent sport, parasympathetic, performance, RMSSD, spectral analysis, sympathetic, team sports, training

Présidence de l'université
40 rue de rennes – BP 73532
49035 Angers cedex
Tél. 02 41 96 23 23 | Fax 02 41 96 23 00

ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussigné(e) Guillaume Ravé
déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiée sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée.
En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport ou mémoire.

signé par l'étudiant(e) le **10** / **10** / **2016**

Cet engagement de non plagiat doit être signé et joint à tous les rapports, dossiers, mémoires.

Présidence de l'université
40 rue de rennes – BP 73532
49035 Angers cedex
Tél. 02 41 96 23 23 | Fax 02 41 96 23 00

université angers

UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

université angers

Thèse de Doctorat

GUILLAUME RAVÉ

Evaluation de l'adaptation à l'entraînement du footballeur professionnel par la variabilité de la fréquence cardiaque

Intérêt de la position debout

Assessment of professional soccer players training adaptation by means of heart rate variability

Interest of standing position

Résumé

La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) est une méthode simple et non invasive permettant d'évaluer l'influence du système nerveux autonome (SNA) sur la fonction cardiaque. Le SNA est constitué de deux branches aux actions antagonistes. Celle dite sympathique est cardio-activatrice et celle dite parasympathique cardio-modératrice. Très étudié dans les sports d'endurance, les indicateurs parasympathiques de la VFC issus de l'analyse spectrale (Hautes fréquences, HF) et temporelle (Root Mean Square of the Successive Differences, RMSSD) s'y avèrent pertinents pour le suivi d'entraînement. Dans un sport comme le football, le grand nombre de matchs durant la saison rend essentiel l'équilibre entre entraînement et récupération. Dans ce contexte, l'utilisation de la VFC peut aider les entraîneurs à optimiser l'entraînement et donc la performance physique des joueurs. Beaucoup de clubs Européens utilisent le marqueur recommandé dans les sports d'endurance (RMSSD). Or le football, sport intermittent, implique théoriquement plus des mécanismes sympathiques (réactivité) que parasympathiques. Effectivement, nos travaux, chez des footballeurs professionnels, montrent que RMSSD n'est pas l'indicateur le plus pertinent, que ce soit pour le suivi d'entraînement lors d'une pré-saison, que pour prédire la perception de la forme physique en compétition. L'analyse spectrale lors d'enregistrements dans la position debout se révèle logiquement plus adaptée puisque cette position met en œuvre le système sympathique. Cependant, cette analyse ne permet pas d'identifier clairement les influences du SNA. De plus, nos résultats remettent en question l'attribution à l'influence parasympathique de RMSSD. En conclusion, la VFC en position debout est un outil pertinent dans la pratique d'un sport intermittent à haut niveau.

Mots clés

Analyse spectrale, athlète, entraînement, parasympathique, performance, RMSSD, sport d'équipe, sport intermittent, sympathique, système nerveux autonome

Abstract

Heart Rate Variability (HRV) is a simple and noninvasive tool to assess autonomic nervous system (ANS) influences to the heart. ANS is made of two opposing effect branches. The sympathetic one activates the heart while the parasympathetic one slows it down. Parasympathetic indicators derived from HRV are well studied in the context of endurance sports. They could be determined by means of time or spectral analysis (Root mean Square of the Successive Difference, RMSSD, and High Frequency, HF, respectively). They provide key information to monitor training adaptation. In the case of soccer, a balance between training charge and recovery is necessary because of the numerous games during a whole season. HRV is supposed to assist coaches in order to optimize training and thus players' physical performance. Many European soccer clubs use the indicator recommended for endurance sports (RMSSD). However, soccer is an intermittent sport that involves theoretically more the sympathetic nervous system (reactivity) than the parasympathetic one. Our studies on professional soccer players show that RMSSD is not the most relevant indicator, neither to monitor training during a pre-season nor to predict fitness perception during competition. We demonstrated that HRV spectral analysis performed while players are standing is more appropriate since this position involved the sympathetic nervous system. However, spectral analysis failed to identify sympathetic nervous system as the key determinant of soccer training adaptation. In addition, our results challenged the link between RMSSD and the parasympathetic nervous system. In conclusion, spectral analysis of HRV performed in the standing position is a useful tool in the case of intermittent high level sports.

Key Words

Athlete, autonomic nervous system, intermittent sport, parasympathetic, performance; RMSSD, spectral analysis, sympathetic, team sports, training

L'Université Bretagne Loire