

La variabilité de la fréquence cardiaque comme indicateur de la forme sportive : étude de cas

Abderrahmen Hadji/ MCA/ Université abderrahmane Mira Bejaia

Abderrahmen.hadji@univ-bejaia.dz

Abstract: The aim of this work is to study the relationship between training load indices (TL) and heart rate variability (HRV). The study consists of monitoring these two variables for a subject practicing a recreational sport (running) at the rate of 2 to 3 sessions per week. The TL is estimated by the relative TRIMP (HRSS). The HRV is measured in the morning with a Polar H7 belt and an Android app for 2 minutes. The results show the exit of a relationship between the EC and the VFC. The training load volume (distance and time) is positively correlated with the RMSSD_RA index ($\alpha < 0.05$). fatigue (ATL) seems to positively stimulate both components of the autonomous system, sympathetic (LF; $\alpha < 0.001$) and parasympathetic (RMSSD_RA and HF; $\alpha < 0.01$; $\alpha < 0.05$ respectively). Fitness (CTL) is positively correlated with LF and LF/HF ratio ($\alpha < 0.01$; $\alpha < 0.05$ respectively). The state of freshness (also called form = TSB) is negatively related to the RMSSD_RA, HF, LF ($\alpha < 0.01$; < 0.05 ; $\alpha < 0.001$ respectively). The ATL/CTL ratio (ACWR) is positively correlated with the RMSSD_RA, LF and HF ($\alpha < 0.05$; $\alpha < 0.001$; 0.01). These results demonstrate that regular physical activity with a large volume can improve the functioning of the autonomic nervous system with these two sympathetic and parasympathetic branches.

Résumé: L'objectif de ce travail est d'étudier la relation entre les indices de la charges d'entraînement (CE) et la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC). L'étude consiste à faire le suivi de ces deux variables pour un sujet pratiquant un sport récréatif (course) à raison de 2 à 3 séances par semaine. La CE est estimée par les TRIMP relatifs (HRSS). La VFC est mesurée le matin avec une ceinture Polar H7 et une application Android pendant 2 minutes. Les résultats démontrent l'existence d'une relation entre la CE et la VFC. Le volume d'entraînement (distance et temps) est corrélé positivement avec l'indice RMSSD_RA ($\alpha < 0.05$). la fatigue (ATL) semble stimuler positivement les deux composantes du systèmes autonome, sympathique (LF ; $\alpha < 0.001$) et parasympathique (RMSSD_RA et HF ; $\alpha < 0.01$; $\alpha < 0.05$ respectivement). La fitness (CTL) est corrélée positivement au LF et le ratio LF/ HF ($\alpha < 0.01$; $\alpha < 0.05$ respectivement). L'état de fraîcheur (appelé aussi forme= TSB) est lié négativement au RMSSD_RA, HF, LF ($\alpha < 0.01$; < 0.05 ; $\alpha < 0.001$ respectivement). Le ratio ATL/CTL (ACWR) est corrélé positivement avec le RMSSD_RA, LF et HF ($\alpha < 0.05$; $\alpha < 0.001$; 0.01). l'intensité de l'entraînement n'est liée à aucun indice de la VFC. Ces résultats démontrent qu'une activité physique régulière avec un volume conséquent peut améliorer le fonctionnement du système nerveux autonomes avec ces deux branches sympathique et parasympathique.

Introduction

La quantification de la charge d'entraînement est un élément important pour la planification et le suivi de la forme des sportifs. Lors d'une enquête auprès de 33 staffs techniques et médicaux des clubs européens de haut niveau, la quantification de la charge a été considérée comme étant l'élément le plus important pour la réussite sportive et la réduction des blessures (ressenti et suivi médical en deuxième et troisième position respectivement) (McCall et al., 2016). Certaines études ont suggéré d'évaluer la CE à l'aide de marqueurs biologiques tels que la consommation d'oxygène ou la concentration de lactate dans le sang (Hopkins, 1991). Cependant, ces mesures nécessitent des équipements spécifiques et sont principalement utilisées dans le cadre de la recherche scientifique. Inversement, d'autres méthodes basées sur la fréquence cardiaque (FC) ou l'évaluation de l'effort perçu (RPE) semblent plus adaptées à une utilisation quotidienne et pratique (Saboul et al., 2016).

À partir de ces marqueurs, plusieurs indices de stress d'entraînement, comme le « TRaining IMPulse » (TRIMP) ou le RPE de session, ont été développés pour évaluer la CE (Banister, 1991; Foster, 1998). La méthode Banister consiste à calculer le rapport entre les moyennes FC pendant l'exercice et la FC de réserve multipliée par le coefficient de pondération et la durée de l'exercice. Inversement, la méthode Foster est basée sur la multiplication d'un score (de 1 à 10) représentant la difficulté d'exercice perçue par l'athlète par la durée de l'exercice. Récemment, cognant est ses collègues ont développé un nouvel indice basé sur la puissance (Allen et Coggan, 2010) . Le TSS (Training stress score) est devenu l'indice le plus populaire notamment en sport cyclique. Il existe aussi des estimations du TSS à partir de la fréquence cardiaque ou le RPE (Friel, 2022).

A l'heure actuelle, il existe 4 modèles pour le suivi de la dynamique de la charge avec ces deux composante forme et fatigue. Nous énumérons les méthodes de calculs pour chaque modèle ci-dessous :

Le modèle de A. Coggan (Allen et Coggan, 2010)
Charge Aigue (Fatigue) = $\text{Charge Aigue}_{\text{Hier}} + (\text{Charge}_{\text{aujourd'hui}} - \text{Charge Aigue}_{\text{Hier}}) / 7$
Charge chronique (Fitness) = $\text{Charge Chronique}_{\text{Hier}} + (\text{Charge}_{\text{aujourd'hui}} - \text{Charge Chronique}_{\text{Hier}}) / 42$
Equilibre de charge (TSB : training Stress Balance) : $\text{Charge chronique} - \text{Charge Aigue}$
Le modèle de Gabbett (Gabbett, 2016)
Charge aigue (Fatigue) d'aujourd'hui = la moyenne mobile des charges des dernière 7 jours

Charge chronique (Fitness) d'aujourd'hui= la moyenne mobile des charges des dernière 28 jours
Le modèle de S. Wiliams « EWMA » (Williams et al., 2017)
Appelé "EWMA : Exponential Weighted Moving Average" . Ce modèle utilise une constante de décroissance temporelle de 7 jours pour la charge aigue et 28 jours pour la charge chronique :
EWMA aujourd'hui = Charge aujourd'hui * λ_a + (1 - λ_a) * EWMA hier
Où : $\lambda_a = 1/(N+2)$ et N= 7 (Aigue) ; 28 (Chronique)
Le modèle de Moussa (Moussa et al., 2019)
Ce modèle apporte une meilleur gestion des données manquantes de l'entraînement. Il est appelé en anglais « Robust Exponential Decreasing Index ». ce qui se traduit en français « Indice de diminution exponentielle robuste ».
$REDI_{aujourd'hui}^{\lambda} = \frac{1}{\sum_{i=0}^{1v} \alpha_i^{\lambda}} \sum \alpha_i^{\lambda} * WL_i \quad \text{où } \alpha_i^{\lambda} = \begin{cases} 0 & \rightarrow \text{WL manquant} \\ e^{-\lambda} & \text{Autrement} \end{cases}$

En appliquant ces modèles, il est possible de dégager une charge aigue et charges chronique. Gabbett (2016) a proposé de calculer le ratio charge aigue / charge chronique et d'en utiliser comme référence pour une bonne gestion de la charge. Dans son étude, il conclut qu'une valeur situant entre 0.8 et 1.3 diminue les risques de blessure (Sweet Spot), alors que les valeurs inférieures à 0.5 ou supérieures à 1.5 sont indicateur de haut risque de blessure.

La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC)

La VFC est une mesure de la variation de temps entre chaque battement de cœur. Cette variation est contrôlée par une partie primitive du système nerveux appelée système nerveux autonome (SNA). Il fonctionne dans les coulisses, régulant automatiquement la fréquence cardiaque, la pression artérielle, la respiration et la digestion, entre autres tâches clés. Le SNA est subdivisé en deux grandes composantes: le système nerveux sympathique et parasympathique, également connu sous le nom de mécanisme de combat ou de fuite et la réponse de relaxation (Harvard Health, 2021).

La VFC peut offrir un moyen non invasif de signaler les déséquilibres du système nerveux autonome. D'après les données recueillies auprès de nombreuses personnes, si le système est plutôt en mode combat ou fuite, la variation entre les battements cardiaques successifs a tendance à être plus faible. Si le système est dans un état plus détendu, la variation entre les battements est plus élevée.

De nombreuses études ont montré que l'utilisation de la VFC comme outil de surveillance dans les programmes d'entraînement sportif peut être bénéfique. Dans des études récentes, l'utilisation de la VFC comme guide d'entraînement engendre des améliorations chez les sportifs par rapport à une planification standard (Bahenský et Grosicki, 2021; Carrasco-Poyatos et al., 2020; Kiviniemi et al., 2010). Ces études ont démontré que le fait de reculer sur la pénibilité de l'exercice lorsque la VFC était diminuée n'entravait pas la performance globale et, dans certains groupes (hommes), la performance était meilleure qu'avec les régimes d'entraînement standard. D'autres études (Kiviniemi et al., 2010; Kiviniemi et al., 2007; Makivić et al., 2013) ont montré que le changement dans la VFC est parallèle aux changements dans la VO2 max, les niveaux d'acide lactique et la modulation vagale. L'exercice d'orientation par VFC peut être un moyen efficace de mesurer ces différents indicateurs critiques qui ne sont généralement pas faciles à surveiller dans un contexte de routine. Étant donné que la surveillance de la VFC peut détecter avec précision ces indicateurs clés du surentraînement, il n'est pas surprenant que la VFC soit également un bon moniteur de ce surentraînement. De multiples études (Hottenrott et al., 2006; Mourot et al., 2004; Uusitalo et al., 2000) ont indiqué que les changements de VFC de la dominance parasympathique vers la dominance sympathique se produisent en parallèle avec le surentraînement. Les chercheurs (Altini et Plews, 2021; Bosquet et al., 2003; Hedelin, Kenttä, et al., 2000; Hedelin, Wiklund, et al., 2000; Hynynen et al., 2006; Mourot et al., 2004; Natarajan et al., 2019; Tian et al., 2013; Uusitalo et al., 2000) ont pu détecter le déséquilibre de l'activité autonome qui se produit lors des phases de surentraînement par la VFC chez les non-athlètes (participants au camp d'entraînement) et les athlètes. Ces résultats pourraient offrir une autre application de la surveillance de la VFC pour le suivi de la forme sportive chez les athlètes amateurs et professionnels (Makivić et al., 2013).

Dans cette optique nous nous sommes posés la question suivante :

La VFC peut-elle être un indicateur de la forme physique et de la dynamique de la charge d'entraînement ?

Méthodologie

Le sujet est âgé de 40 ans pratiquant un sport récréatif . Avec 2 à 3 de courses par semaine. Un IMC =24.2 témoignant d'une corpulence normale (OMS, 2021). La mesure de la VFC se fait par le biais d'une ceinture cardiaque Polar H7 (Polar Electro Oy) qui est a été validé

scientifiquement (Hernández-Vicente et al., 2021) couplé à une application Android par Bluetooth. L'application en question « Hrv4Training » est aussi validée scientifiquement pour la mesure et l'analyse de la VFC (comparé à Kubios) (Stone et al., 2021).

Mesure de la VFC : Le sujet prenait la mesure chaque matin après la toilette , allongé sur le dos , la ceinture bien humidifiée avec de l'eau. La durée de mesure a été fixé à 120 sec (2 minute). Cette durée est approuvée pour des résultats fiables (Maheshwari et al., 2016). Pour cette étude, nous avons utilisé que les indicateur de VFC suivants : RMSSD (Root Mean Square of Standard Deviation), RMSSD_RA (RA : Rowling average ; c'est la moyenne mobile des 7 derniers jours) LF (Low Frequency) ,HF (High Frequency) et le ratio LF/HF.

Mesure de la charge d'entraînement : Pour chaque séance d'entraînement, la charge d'entraînement (CE) est calculée à partir des données la fréquence cardiaque (FC) mesurées par la ceinture Polar H7 et enregistrées sur une montre Garmin (Forerunner 245). La CE est estimée par la méthode TRIMP relatives, appelée en anglais HRSS (Herat Rate Stress Score). Cette méthode consiste à relativiser (rapport) le TRIMP de Banister (Banister, 1991) à un TRIMP théorique d'une séance d'une heure à une fréquence cardiaque égale à la fréquence au seuil lactique (TRIMP_{seuil}).

$$HRSS = (TRIMP_{Banister} / TRIMP_{seuil}) * 100$$

Où : $TRIMP_{Banister} = T * \Delta FC * K$

T = durée en minute de la séance

$$\Delta FC = (FC_{exercice} - FC_{repos}) / (FC_{max} - FC_{repos})$$

$K = 0,86 * e^{1,67 * \Delta FC}$ pour les femmes ; $0,64 * e^{1,92 * \Delta FC}$ pour les hommes

$$TRIMP_{seuil} = 60 * \Delta FC * K$$

Où : $\Delta FC = (FC_{Seuil} - FC_{repos}) / (FC_{max} - FC_{repos})$

$K = 0,86 * e^{1,67 * \Delta FC}$ pour les femmes ; $0,64 * e^{1,92 * \Delta FC}$ pour les hommes

Détermination des paramètres inhérents aux différents calculs de la charge d'entraînement :

La fréquence cardiaque au repos : la moyenne mobile des FC repos des 7 derniers jours. La FC repos est mesurée automatiquement par la montre Garmin Forerunner 245 chaque matin ; **La fréquence cardiaque maximale :** enregistrée automatiquement lors d'un test d'effort maximal

(appelé « 30 MTT : 30 minute time trial » en anglais) ; **La FC au seuil lactique** : la détermination de la fréquence cardiaque est réalisée avec le test de 30 MTT. le test consiste à courir 30 minutes avec la vitesse la plus élevée possible. La fréquence au seuil lactique (4mmol) est déterminée par la moyenne des dernières 20 minutes. Les résultats de ce test ne représente pas de différences à celle d'une mesure directe du lactate au laboratoire (McGehee et al., 2005).

Dynamique de la charge et de la forme sportive : Dans ce travail, nous avons adopté l'approche de A. Coggan (Allen et Coggan, 2010). Cette approche consiste à calculer la charge aigue -appelé fatigue- (« Acute worckload » en anglais) et la charge chronique -appelée fitness ou forme sportive- (« Chronic worckload » en anglais) et l'équilibre entre les deux -représente l'état de fraîcheur du moment- (« TSB : Training stress balance » en anglais) . le ratio charge aigue sur charge chronique a été aussi calculé comme proposé par Gabbett (Gabbett, 2016; Hulin et al., 2016) (« ACWR : Acute Chronic worckload Ratio » en anglais) .

Les indicateurs de la charges sont calculés selon les formules suivantes :

$$\text{Charge Aigue (ATL)} = \text{Charge Aigue}_{\text{Hier}} + (\text{Charge}_{\text{aujourd'hui}} - \text{Charge Aigue}_{\text{Hier}})/7$$

$$\text{Charge chronique (CTL)} = \text{Charge Chronique}_{\text{Hier}} + (\text{Charge}_{\text{aujourd'hui}} - \text{Charge Chronique}_{\text{Hier}})/42$$

$$\text{Equilibre de charge (TSB)} : \text{Charge chronique} - \text{Charge Aigue}$$

$$\text{Ratio Aigue : Chronique (ACWR)} = \text{Charge Aigue} / \text{Charge chronique}$$

Résultats

Table N° 1. Statistique descriptive des modalités de la VFC et la CE

	Nombre	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
Charge d'entraînement					
Distance (m)	33	5081	3931	1672	13798
Temps (min)	33	41	30	13	123
HRSS (UA)	33	47	34.682	5	135
ATL (UA)	128	12.676	9.177	0.85	41.14
CTL (UA)	128	12.427	3.243	6.86	20
TSB (UA)	128	-0.248	7.454	0.1	10.29
ACRW (UA)	128	0.965	0.586	0.12	2.31
Variabilité de la fréquence cardiaque					
RMSSD	78	45.246	19.783	16.94	130.74

RMSSD_RA	117	45.711	8.048	27	64.9
Ln_RMSSD	117	1.653	0.081	1.43	1.81
LF (ms ²)	78	660	390	100	1900
HF (ms ²)	78	790	480	200	2200
LF/HF	78	0.915	0.42	0.2	3.22

Le tableau représente les statistiques descriptives des variables étudiées dans cette étude. Il convient de rappeler que le nombre de mesures de la VFC est indépendant du nombre de séances d'entraînements. Le nombre de modalités représentant la dynamique de la charge en l'occurrence : ATL, CTL, TSB, ACRW est indépendant des nombres de séances, vu qu'elle sont calculées depuis la première séance jusqu' la dernière sans prendre considération de la nature de la journée séance d'entraînement ou repos. Au final, l'individu a réalisé 33 séances d'entraînement et 78 mesures de VFC.

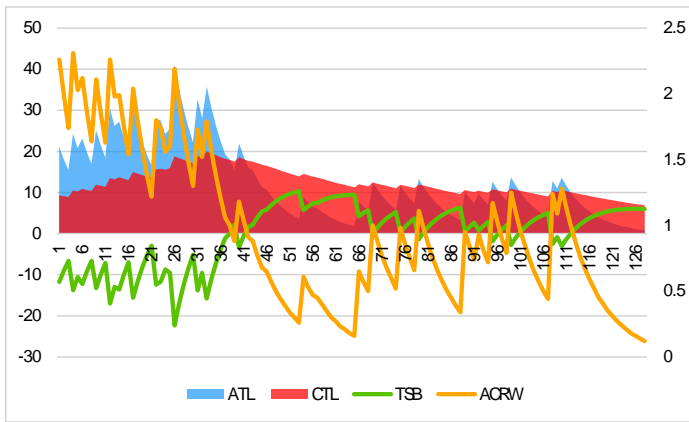


Figure N° 1. Dynamiques des modalités de la charge d'entraînement (PMC)

Cette figure représente le graphique de la gestion de la performance-« performance management chart » en anglais- proposé par Allen et Coggan (2010). L'ATL représente le cumule de fatigue engendré par le stress de l'entraînement. Le CTL représente le cumule de forme physique. le TSB est la forme actuel du sportif. Le ACRW est un indice lié au risque de blessure et sur entraînement.

Table N° 2. Matrice de corrélation entre les modalités de la VFC et les modalités de la CE

		Charge d'entraînement							
		Distance	Temps	Intensité	HRSS	TSB	ATL	CTL	ACWR
RMSSD	R	0.043	0.066	-0.213	0.105	-0.148	0.148	0.101	0.158

	p-value	0.867	0.794	0.396	0.677	0.195	0.195	0.381	0.168
RMSSD_RA	R	0.393 *	0.409 *	-0.099	0.310	-0.267 **	0.247 **	0.068	0.206 *
	p-value	0.024	0.018	0.585	0.080	0.004	0.007	0.466	0.026
Ln_RMSSD	R	0.375 *	0.379 *	-0.105	0.290	-0.237 *	0.205 *	0.019	0.177
	p-value	0.032	0.030	0.561	0.102	0.010	0.027	0.837	0.056
LF	R	0.270	0.327	-0.325	0.267	-0.386 ***	0.403 ***	0.314 **	0.371 ***
	p-value	0.278	0.186	0.188	0.283	<.001	<.001	0.005	<.001
HF	R	0.034	0.022	-0.062	0.064	-0.311 **	0.277 *	0.105	0.343 **
	p-value	0.893	0.930	0.806	0.801	0.006	0.014	0.360	0.002
LF/HF	R	0.115	0.211	-0.374	0.049	-0.028	0.109	0.274 *	0.008
	p-value	0.650	0.402	0.126	0.847	0.809	0.343	0.015	0.944

Le Table N° 2 et la Figure N° 2 représente l'ensemble de corrélations entre les modalités des deux variable à savoir la CE et la VFC. Les corrélation significatives sont présenté et discuté individuellement ci-dessous.

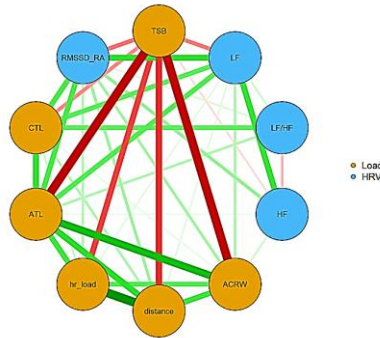


Figure N° 2. Corrélographe des modalités de la VFC (HRV) et La CE (Load)

Cette figure illustre la matrice de corrélation entre la charge d'entraînement et la VFC. Les cercle en orange représente les modalité de la charge d'entraînement. Les cercles en bleu représentent les modalité de la VFC. Les lignes rouges représentent un corrélation négative et les verts une corrélation positive. L'épaisseur de la ligne renvoi à la puissance de la corrélation entre deux modalités.

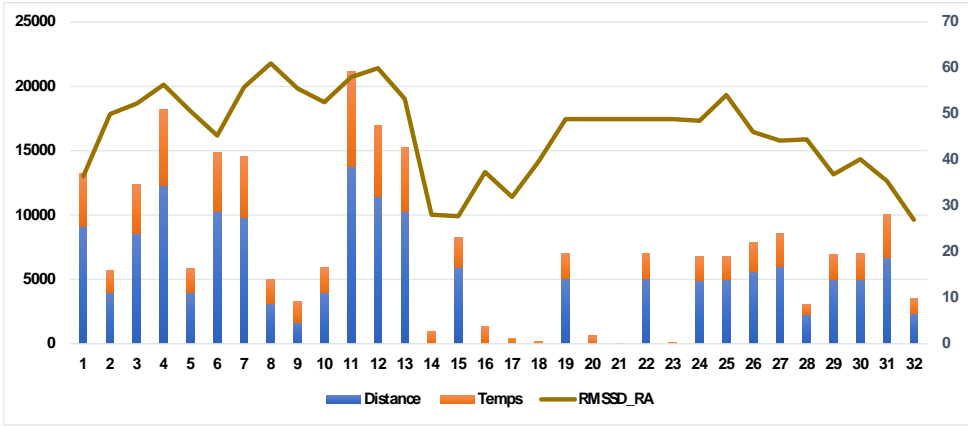


Figure N° 3. Evolution de la VFC (RMSSD_RA) avec le volume de la charge d'entraînement (distance et intensité)

La Distance et le temps (volume d'entraînement) : la distance est corrélée positivement avec la moyenne mobile du RMSSD. Ceci signifie que des grandes distance stimule d'avantage le système parasympathique. En revanche, L'intensité et la charge de l'entraînement (HRSS) ne démontre pas de relation significative avec la VFC.

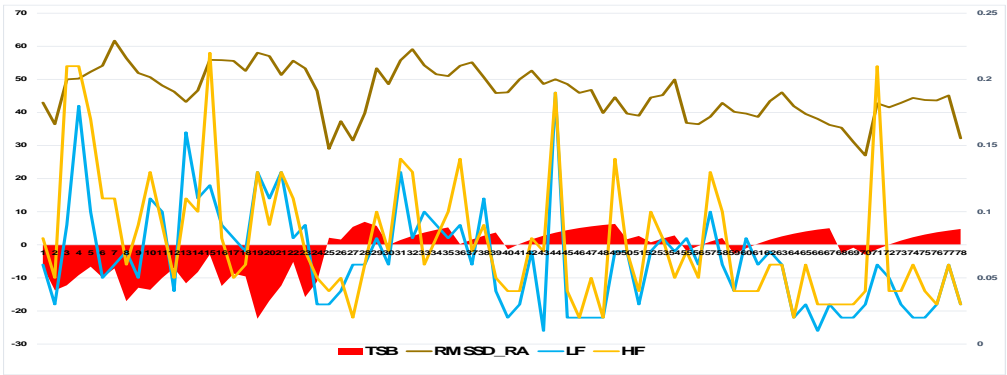


Figure N° 4. Evolution de de le fitness (TSB) avec les modalités de la VFC (RMSSD_Ra, LF et HF)

La corrélation du TSB est négative avec le RMSSD, LF et HF. Dans les jours où la charge d'entraînement est élevée par rapport au niveau de forme (productif), une augmentation de la

VFC est enregistrée témoignant d'une adaptation positive (résilience) au stress ainsi qu'une bonne capacité du système parasympathique a enclenché les mécanismes de récupération.

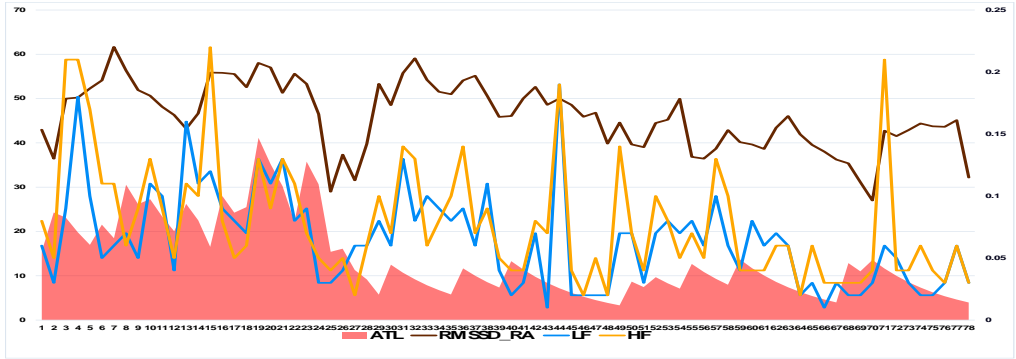


Figure N° 5. Evolution de la fatigue (ATL), RMSSD_RA, LF et HF

Le cumul de la fatigue pendant les 7 derniers jours (ATL = Fatigue) présente une corrélation positives avec l'indice LF qui représente l'activité de système sympathique et qui témoigne d'un stress physiologique élevé.

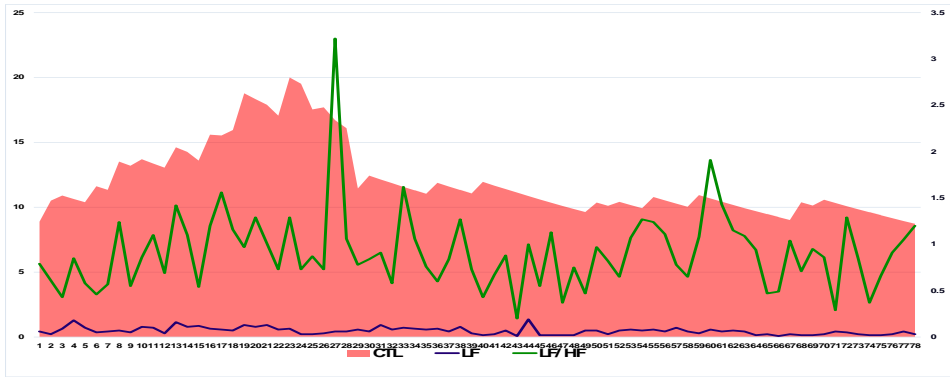


Figure N° 6. Evolution de la forme (CTL), LF et le ratio LF/HF

Le cumul de charge d'entraînement sur 42 jours (CTL= Forme) induit une augmentation de la forme physique. cette forme est corrélée positivement avec le ration LF/HF l'équilibre des systèmes sympathique et parasympathique.

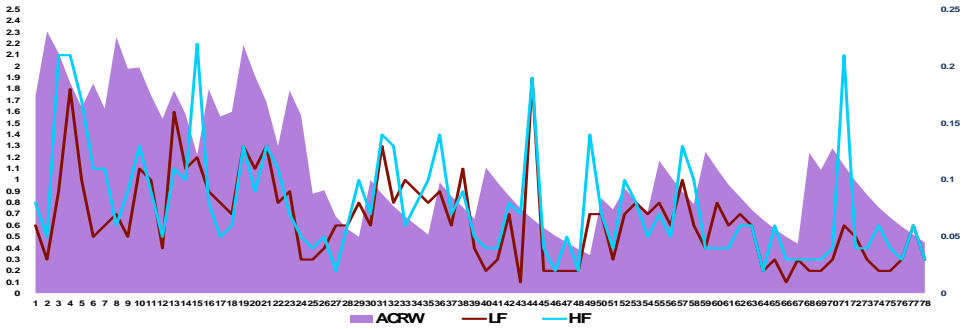


Figure N° 7. Evolution du ratio ATL/CTL (ACWR), LF et HF.

Le ratio ATL/CTL (ACWR) est corrélé positivement avec le LF et HF. Ce qui signifie que ce ratio peut être un bon indicateur sur l'efficacité du stimulus d'entraînement sur le système nerveux autonome avec ses deux branches

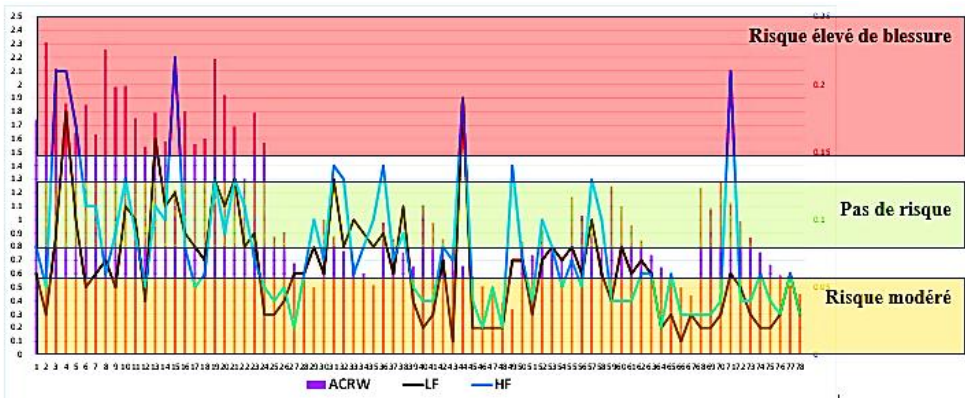


Figure N° 8. Evolution du LF, HF avec le du ratio ATL/CTL (ACWR) dans les zones de risque.

Ce graphe démontre que le risque de blessure est plus élevé au début de la période d'entraînement. Après un mois, ce risque diminue grâce aux adaptations physiologiques accompagnant l'augmentation de la forme physique.

Discussion

Le volume d'entraînement exprimé en distance ou temps démontre une relation positive avec la moyenne mobile du RMSSD. Ceci signifie qu'un grand volume d'entraînement stimule d'avantage le système parasympathique. En revanche, L'intensité de l'entraînement (HRSS) ne démontre pas de relation significative avec la VFC. Dans les jours où la charge d'entraînement est proportionnellement plus élevée par rapport au niveau de forme (productif), une augmentation de la VFC est enregistrée témoignant d'une adaptation positive (résilience) au stress ainsi qu'une bonne capacité du système parasympathique a enclenché les mécanismes de récupération. Le cumul de la fatigue pendant les 7 derniers jours (ATL = Fatigue) présente une corrélation positives avec l'indice LF qui représente l'activité de système sympathique et qui témoigne d'un stress physiologique élevé. Le cumul de charge d'entraînement sur 42 jours (CTL= Forme) induit une augmentation de la forme physique. cette forme est corrélée positivement avec le ration LF/HF l'équilibre des systèmes sympathique et parasympathique. Le ratio ATL/CTL (ACWR) est corrélé positivement avec le LF et HF. Ce qui signifie que ce ratio peut être un bon indicateur sur l'efficacité du stimulus d'entraînement sur le système nerveux autonome avec ses deux branches. Le risque de blessure est plus élevé au début de la période d'entraînement. Après un mois, ce risque diminue grâce aux adaptations physiologiques accompagnant l'augmentation de la forme physique.

Conclusion

Les résultats de la présente étude ont démontré que le modèle de quantification de la charge proposé par Coggan (Allen et Coggan, 2010) est cohérent avec les réponses physiologique du système nerveux autonome chez un sujet pratiquant une activité physique récréative (APR). la VFC est un moyen très utiles pour le suivi de la forme physique.

Le volume d'entraînement semble avoir un impact plus prononcé sur les adaptations physiologique que l'intensité d'entraînement chez un sujet pratiquant un sujet pratiquant un APR.

En dépit de sa capacité à prédire les risque de blessure, le ratio ATL/CTL (ACWR) peut être utilisé comme indicateur de l'efficacité du stimulus d'entraînement sur le système nerveux autonome avec ses deux branches.

Le risque de blessure est plus élevé au début de la période d'entraînement. Ce risque diminue au fil du temps grâce à une amélioration de la forme physique.

La quantification de la charge d'entraînement dans sa dimension dynamique en parallèle d'un suivi des réponses physiologique par VFC semble répondre aux connaissances scientifiques déjà établies. L'utilisation de cette approche permet l'optimisation de la planification et le suivi de l'entraînement sportif en préservant la santé et la performance du sportif d'élite et amateur.

References

- Allen, H. et Coggan, A. R. (2010). *Training and racing with a power meter*. VeloPress.
- Altini, M. et Plews, D. (2021). What is behind changes in resting heart rate and heart rate variability? A large-scale analysis of longitudinal measurements acquired in free-living. *Sensors*, 21(23), 7932.
- Bahenský, P. et Grosicki, G. J. (2021). Superior Adaptations in Adolescent Runners Using Heart Rate Variability (HRV)-Guided Training at Altitude. *Biosensors*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/bios11030077>
- Banister, E. W. (1991). Modeling elite athletic performance. Dans *Physiological testing of elite athletes* (vol. 347, p. 403-422). Kinanthropometry Champaign IL: Human Kinetics Books.
- Bosquet, L., Papelier, Y., Leger, L. et Legros, P. (2003). Night heart rate variability during overtraining in male endurance athletes. *Journal of sports medicine and physical fitness*, 43(4), 506.
- Carrasco-Poyatos, M., González-Quílez, A., Martínez-González-Moro, I. et Granero-Gallegos, A. (2020). HRV-Guided Training for Professional Endurance Athletes: A Protocol for a Cluster-Randomized Controlled Trial. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(15). <https://doi.org/10.3390/ijerph17155465>
- Foster, C. (1998). Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(7), 1164-1168.
- Friel, J. (2022). *Estimating Training Stress Score (TSS) | TrainingPeaks*. <https://www.trainingpeaks.com/learn/articles/estimating-training-stress-score-tss>
- Gabbett, T. J. (2016). The training-injury prevention paradox: should athletes be training smarter and harder? *British journal of sports medicine*, 50(5), 273-280. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095788>

- Harvard Health. (2021). *Heart rate variability: How it might indicate well-being - Harvard Health*.
<https://www.health.harvard.edu/blog/heart-rate-variability-new-way-track-well-2017112212789>
- Hedelin, R., Kenttä, G., Wiklund, U., Bjerle, P. E. R. et Henriksson-Larsén, K. (2000). Short-term overtraining: effects on performance, circulatory responses, and heart rate variability. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(8), 1480-1484.
- Hedelin, R., Wiklund, U., Bjerle, P. et Henriksson-Larsén, K. (2000). Cardiac autonomic imbalance in an overtrained athlete. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(9), 1531-1533.
- Hernández-Vicente, A., Hernando, D., Marín-Puyalto, J., Vicente-Rodríguez, G., Garatachea, N., Pueyo, E. et Bailón, R. (2021). Validity of the polar h7 heart rate sensor for heart rate variability analysis during exercise in different age, body composition and fitness level groups. *Sensors*, 21(3), 902.
- Hopkins, W. G. (1991, 1991/09/01). Quantification of Training in Competitive Sports. *Sports Medicine*, 12(3), 161-183. <https://doi.org/10.2165/00007256-199112030-00003>
- Hottenrott, K., Hoos, O. et Esperer, H. D. (2006). Heart rate variability and physical exercise. Current status. *Herz*, 31(6), 544-552.
- Hulin, B. T., Gabbett, T. J., Caputi, P., Lawson, D. W. et Sampson, J. A. (2016). Low chronic workload and the acute: chronic workload ratio are more predictive of injury than between-match recovery time: a two-season prospective cohort study in elite rugby league players. *British journal of sports medicine*, 50(16), 1008-1012.
- Hynynen, E. S. A., Uusitalo, A., Konttinen, N. et Rusko, H. (2006). Heart rate variability during night sleep and after awakening in overtrained athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(2), 313.
- Kiviniemi, A. M., Hautala, A. J., Kinnunen, H., Nissilä, J., Virtanen, P., Karjalainen, J. et Tulppo, M. P. (2010). Daily exercise prescription on the basis of HR variability among men and women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(7), 1355-1363.
- Kiviniemi, A. M., Hautala, A. J., Kinnunen, H. et Tulppo, M. P. (2007). Endurance training guided individually by daily heart rate variability measurements. *European journal of applied physiology*, 101(6), 743-751.

- Maheshwari, A., Norby, F. L., Soliman, E. Z., Adabag, S., Whitsel, E. A., Alonso, A. et Chen, L. Y. (2016). Low heart rate variability in a 2-minute electrocardiogram recording is associated with an increased risk of sudden cardiac death in the general population: the atherosclerosis risk in communities study. *PLOS ONE*, 11(8), e0161648.
- Makivić, B., Nikić Djordjević, M. et Willis, M. S. (2013). Heart Rate Variability (HRV) as a tool for diagnostic and monitoring performance in sport and physical activities. *Journal of Exercise Physiology Online*, 16(3).
- McCall, A., Dupont, G. et Ekstrand, J. (2016). Injury prevention strategies, coach compliance and player adherence of 33 of the UEFA Elite Club Injury Study teams: a survey of teams' head medical officers. *British journal of sports medicine*, 50(12), 725. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095259>
- McGehee, J. C., Tanner, C. J. et Houmard, J. A. (2005). ACOMPARISON OF METHODS FOR ESTIMATING THE LACTATE THRESHOLD. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 19(3), 553-558.
- Mourot, L., Bouhaddi, M., Perrey, S., Cappelle, S., Henriët, M. T., Wolf, J. P., Rouillon, J. D. et Regnard, J. (2004). Decrease in heart rate variability with overtraining: assessment by the Poincaré plot analysis. *Clinical physiology and functional imaging*, 24(1), 10-18.
- Moussa, I., Leroy, A., Saulière, G., Schipman, J., Toussaint, J.-F. et Sedeaud, A. (2019). Robust Exponential Decreasing Index (REDI): adaptive and robust method for computing cumulated workload. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 5(1), e000573.
- Natarajan, A., Pantelopoulos, A., Emir-Farinas, H. et Natarajan, P. (2019). Heart rate variability with photoplethysmography in 8 million individuals: results and scaling relations with age, gender, and time of day. *bioRxiv*, 772285.
- OMS, o. m. d. l. s. (2021). Obésité et surpoids. *World Health Organization: WHO*. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>
- Saboul, D., Balducci, P., Millet, G., Pialoux, V. et Hautier, C. (2016, 2016/02/17). A pilot study on quantification of training load: The use of HRV in training practice. *European Journal of Sport Science*, 16(2), 172-181. <https://doi.org/10.1080/17461391.2015.1004373>
- Stone, J. D., Ulman, H. K., Tran, K., Thompson, A. G., Halter, M. D., Ramadan, J. H., Stephenson, M., Finomore Jr, V. S., Galster, S. M. et Rezai, A. R. (2021). Assessing the accuracy of

popular commercial technologies that measure resting heart rate and heart rate variability. *Frontiers in Sports and Active Living*, 37.

- Tian, Y., He, Z.-h., Zhao, J.-x., Tao, D.-l., Xu, K.-y., Earnest, C. P. et Mc Naughton, L. R. (2013). Heart rate variability threshold values for early-warning nonfunctional overreaching in elite female wrestlers. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(6), 1511-1519.
- Uusitalo, A. L. T., Uusitalo, A. J. et Rusko, H. K. (2000). Heart rate and blood pressure variability during heavy training and overtraining in the female athlete. *International Journal of Sports Medicine*, 21(01), 45-53.
- Williams, S., West, S., Cross, M. J. et Stokes, K. A. (2017). Better way to determine the acute:chronic workload ratio? *British journal of sports medicine*, 51(3), 209. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096589>