



HAL
open science

Conception d'un système informatique ergonomique pour modéliser et gérer l'entraînement : application au volley-ball professionnel

Stéphane Morin

► **To cite this version:**

Stéphane Morin. Conception d'un système informatique ergonomique pour modéliser et gérer l'entraînement : application au volley-ball professionnel. Education. Université de Picardie Jules Verne, 2015. Français. NNT : 2015AMIE0004 . tel-03693143

HAL Id: tel-03693143

<https://theses.hal.science/tel-03693143>

Submitted on 10 Jun 2022

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

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



Université de Picardie Jules Verne

École doctorale « Sciences, Technologie, Santé » (ED 547)

Laboratoire de Recherche
« Adaptations physiologiques à l'exercice et Réadaptation à l'Effort »,
EA-3300, UFR-STAPS

Thèse de Doctorat

Spécialité : STAPS

En vue de l'obtention du grade de
Docteur de l'Université de Picardie Jules Verne

Conception d'un Système Informatique Ergonomique pour Modéliser et Gérer l'Entraînement : Application au Volley-Ball Professionnel

Présentée et soutenue publiquement par
Stéphane MORIN

Le 18 mai 2015

Après avis des rapporteurs, devant le jury d'examen composé de :

Rapporteurs :

- **GARCIN Murielle**, P.U., Université Lille 2 Droit et Santé
- **DUPONT Grégory**, M.C.U., HDR, Université d'Artois, Liévin

Examineurs :

- **PRIOUX Jacques**, P.U., ENS Rennes
- **BOCQUET Valery**, Dr, Luxembourg Institute of Health

Directeurs :

- **AHMAIDI Saïd**, P.U., Université de Picardie Jules Verne, Amiens
- **LEPRÊTRE Pierre-Marie**, M.C.U., Université de Picardie Jules Verne, Amiens

« Quand on voyage vers un objectif, il est très important de prêter attention au chemin. C'est toujours le chemin qui nous enseigne la meilleure façon d'y parvenir, et il nous enrichit à mesure que nous le parcourons. C'est ainsi quand on a un objectif dans la vie. Il peut devenir meilleur ou pire, cela dépend du chemin que nous choisissons pour l'atteindre et de la manière dont nous le parcourons. »

Paulo Coelho, Le Pèlerin de Compostelle

REMERCIEMENTS

Professeur d'EPS, préparateur physique, en quelque sorte expert du « savoir bouger », cette thèse m'a fait redécouvrir la rigueur indispensable à toute démarche scientifique ainsi que les vertus et la complexité du travail en équipe. En effet, ce travail doctoral n'aurait jamais pu être réalisé sans l'aide et le soutien de personnes dont l'enthousiasme, l'intérêt et les critiques manifestés à l'égard de mon étude m'ont permis d'avancer sur le chemin de la recherche scientifique.

Monsieur **Pr AHMAIDI Saïd**, directeur de thèse, directeur de l'équipe d'accueil 3300 : Après avoir été longtemps collègues et assurés des tâches de direction ensemble, je souhaite vivement te remercier pour avoir accepté d'encadrer ma thèse. Je te suis reconnaissant pour tes qualités scientifiques, ton ouverture d'esprit et ta sagesse.

Monsieur **Dr LEPRÊTRE Pierre-Marie**, codirecteur de thèse : je t'adresse mes remerciements pour ta patience, tes critiques, tes idées et tes conseils tout au long de ces années. Ta rigueur et ton exigence de qualité inaltérables ont été prépondérantes pour conduire cette thèse à son terme.

Madame **Pr GARCIN Murielle**, experte reconnue des échelles de perception appliquée à l'activité physique, et Monsieur **Dr DUPONT Grégory, HDR** expert des procédures d'amélioration de la performance par l'entraînement, je suis très sensible à l'intérêt que vous avez porté à mon travail et au regard critique que vous avez exercés. J'associe à ces remerciements Monsieur **Pr PRIOUX Jacques**, expert des adaptations physiologiques à l'exercice et Monsieur **Dr BOCQUET Valery**, biostatisticien pour avoir examiné ce travail.

Monsieur **DUVIVIER Dominique**, entraîneur adjoint et préparateur physique du club « Volleyball Nantes » : je désire te remercier de m'avoir fait confiance tout au long de ces années. Tes remarques, tes interrogations et ton aide sur le terrain ont été autant d'éléments qui m'ont permis de faire murir ce travail. J'associe à ces remerciements Monsieur **QUINQUIS Sylvain**, entraîneur général du club : en tant que garant de la pérennité de l'équipe professionnelle au plus haut niveau, tes doutes m'ont obligé à sans

cesse approfondir mon travail. Permettez-moi de vous remercier pour ce cadre de travail idéal.

Mon travail de recherche n'aurait jamais été possible sans la participation assidue et l'investissement sincère des **joueuses professionnelles du « VolleyBall Nantes »** qui ont permis que cette étude se réalise dans les meilleures conditions. Je vous remercie chaleureusement.

Monsieur **JEULAND Pierre-Yves**, entraîneur, préparateur physique et maintenant président de la société TrainingLoad Pro : de la licence STAPS « Entraînement Sportif » au Master, tu as participé activement à ce projet. Je te remercie pour tous nos échanges qui ont permis de mettre à jour les difficultés et les incohérences de ce projet, et surtout pour ta patience face aux bugs du logiciel dont tu as été le testeur principal. J'associe à ces remerciements Monsieur **MARIE Steve** : ton aide sur le terrain ainsi que ton enthousiasme et ta motivation ont été précieux.

Je remercie **l'Université de Nantes, l'UFR STAPS de Nantes** et la **SATT Ouest Valorisation** pour leurs soutiens logistique et financier qui ont conduit à la création de la société **TrainingLoad Pro**.

J'associe également Messieurs **FURLAN Jean-Marc** (entraîneur) et **JOUBERT Thomas** (Adjoint Préparateur physique) de **l'ESTAC Troyes** pour m'avoir permis de mettre en place, et amélioré, l'outil et l'algorithme avec les footballeurs professionnels durant la saison 2014-2015.

Ces remerciements seraient bien sûr incomplets si je n'en adressais pas tout particulièrement à **mes parents** pour m'avoir toujours soutenu dans mes études.

Enfin, et surtout, à toi, **Anne-Claire**, mon épouse, pour ta patience, tes encouragements de tous les jours. À nos enfants, **Augustin**, 8 ans, et **Valentine**, 6 ans, pour avoir tant attendu et joué en « silence », sans trop comprendre pourquoi je restais aussi longtemps devant mon ordinateur. Merci à tous les trois pour votre soutien sans faille tout au long de cette thèse de doctorat.

ABRÉVIATIONS ET GLOSSAIRE

ENTRAÎNEMENT

Affûtage : Diminution de la charge d'entraînement au cours d'une période de durée variable, afin de diminuer la fatigue physiologique et psychologique induite par les cycles d'entraînement précédents et optimiser la performance (Mujika & Padilla, 2000a)

Aptitude : « *Substrat constitutionnel d'une capacité, préexistant à celle-ci, qui dépendra du développement naturel de l'aptitude, de la formation éducative, et de l'exercice. Seule la capacité peut être objet d'évaluation directe, l'aptitude étant une virtualité¹* ». Piéron H. cité par Danvers F. (2009)

Capacité : Ce que l'influence du milieu a fait de l'aptitude. Elle correspond au résultat d'un processus d'entraînement. Elle renvoie à l'activité du sportif.

CE : Charge d'entraînement.

CPQ : Capacité de performance quotidienne.

Endurance : « *Capacité psycho-physique de résistance à la fatigue du sportif²* » (Weineck, J., 1983)

Fatigue : Diminution transitoire de la capacité de performance due à l'activité physique quand elle a duré pendant un certain temps, généralement attestée par une incapacité à maintenir ou développer une certaine force ou la puissance attendue (Asmussen E., 1979)

Fitness : Terme anglais, « fitness » est toujours difficile à traduire, car il est très dépendant du contexte. Pour Banister et coll. (1975) et Morton et coll. (1990) il nous semble être plus proche de la notion de capacité que d'aptitude (cf. définitions). En France, ce mot est souvent synonyme de l'état de forme. Cependant, dans la recherche scientifique anglophone, le terme est plus proche d'aptitude. Notre traduction libre du mot Fitness sera donc Aptitude.

Perceptif : "*Événement cognitif dans lequel un stimulus ou un objet, présent dans l'environnement immédiat d'un individu, lui est représenté dans son activité psychologique interne, en principe de façon consciente*" (Dictionnaire Larousse)

¹ Page 47

² Page 79

INFORMATIQUE

SQL : Structured Query Language. Langage informatique servant à effectuer des opérations sur les bases de données.

HTML : Hypertext Markup Language. Langage de balisage pour décrire de l'hypertexte, structurer sémantiquement et mettre en forme le contenu des pages Web.

CSS : Cascading Style Sheets. Langage informatique pour décrire la présentation des documents HTML et XML. Les standards définissant CSS sont publiés par le World Wide Web Consortium (W3C).

XML : Extensible Markup Language. Langage informatique de balisage générique dont la syntaxe est dite extensible reconnaissable par l'usage des chevrons (<>) encadrant les balises. Son intérêt est de faciliter l'échange automatisé de contenus complexes entre systèmes d'informations hétérogènes (interopérabilité).

PHP : Hypertext Preprocessor (acronyme récursif). Langage de programmation compilé à la volée (« Just in time »), libre, principalement utilisé pour produire des pages Web dynamiques via un serveur HTTP.

Javascript : langage de programmation de scripts orienté objet principalement utilisé dans les pages web interactives, mais aussi côté serveur.

JQuery : bibliothèque (collection de fonctions, compilée et prête à être utilisée par un programme) JavaScript libre qui vise à simplifier les commandes communes de JavaScript (événements, effets visuels, animations)

Framework : ensemble de composants logiciels structurels utilisé pour créer les structures de tout ou d'une partie d'un logiciel.

Serveur : dispositif informatique matériel et/ou logiciel qui offre des services, à différents clients (courrier électronique, accès aux informations du Web)

OS X : système d'exploitation développé et commercialisé par Apple

Android : système d'exploitation open source utilisant le noyau Linux, pour certains Smartphones (dont la traduction française est ordiphone, mais qui reste très peu utilisé), tablettes et terminaux mobiles.

Base de données relationnelles : ensemble d'informations décomposées et organisées dans des matrices appelées relations ou tables. Le contenu de la base de données peut ainsi être synthétisé par des opérations d'algèbre relationnelle telles que l'intersection, la jointure.

Table : ensemble de données organisées sous forme d'un tableau où les colonnes correspondent à des catégories d'information et les lignes à des enregistrements, également appelés entrées.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	4
ABRÉVIATIONS ET GLOSSAIRE	6
TABLE DES MATIÈRES.....	8
INTRODUCTION GÉNÉRALE	14
1- CADRE THÉORIQUE.....	18
1.1- PREAMBULE.....	21
1.1.1- <i>Charge d'entraînement</i>	21
1.1.2- <i>Volume</i>	22
1.1.3- <i>Intensité</i>	23
1.1.4- <i>Interactions volume-intensité</i>	24
1.2- AUTOREGULATION.....	26
1.3- SYSTEME ENTRAINEMENT-PERFORMANCE	29
1.3.1- <i>Modèle originel : aptitude et fatigue</i>	30
1.3.1.1- Fatigue et performance	31
1.3.1.2- Performance en sports collectifs.....	33
1.3.1.3- Régularité des entraînements	36
1.3.1.4- Durée optimale de récupération.....	38
1.3.1.5- Paramétrage du modèle	41
1.3.1.5.1- Nombre de paramètres	41
1.3.1.5.2- Récursivité des paramètres	42
1.3.1.5.3- Itération des paramètres.....	45
1.3.1.6- Effet de la fréquence des entraînements.....	46
1.3.1.7- Influence relative des variables.....	48
1.3.2- <i>Potentiel personnel et limites acceptables</i>	51
1.3.3- <i>Autorégulation et rétroaction</i>	54
1.4- MARQUEURS MECANIQUES, BIOLOGIQUES ET/OU SUBJECTIFS.....	58
1.4.1- <i>Marqueurs physiologiques</i>	59
1.4.1.1- La fréquence cardiaque et sa variabilité	59
1.4.1.2- La lactatémie.....	63
1.4.2- <i>Marqueurs mécaniques</i>	65
1.4.2.1- Puissance mécanique.....	65

1.4.2.2-	Vitesse.....	67
1.4.3-	<i>Marqueurs perceptifs</i>	71
1.4.3.1-	Estimation subjective.....	71
1.5-	SYNTHESE.....	80
1.5.1-	<i>Stimulus : la notion de CE</i>	80
1.5.2-	<i>Réponse : l'état de fatigue</i>	81
1.5.3-	<i>Précision des modèles</i>	82
1.5.4-	<i>Perspectives</i>	84
1.5.4.1-	Intensité perçue.....	85
1.5.4.2-	Fatigue.....	86
1.5.4.3-	État d'esprit.....	87
1.5.4.4-	Endormissement - Sommeil.....	88
1.5.5-	<i>Mesures longitudinales</i>	90
2-	HYPOTHÈSES DE TRAVAIL ET OBJECTIFS.....	92
3-	APPORT PERSONNEL.....	96
3.1-	POSTULAT DE TRAVAIL.....	97
3.1.1-	<i>Préambule</i>	98
3.1.2-	<i>Mouvement harmonique simple amorti et modélisation des oscillations des effets de la charge</i>	100
3.1.2.1-	Effets cumulés des journées d'entraînement.....	102
3.1.2.2-	Effets actuels et différés d'une journée d'entraînement.....	104
3.1.2.2.1-	Période, T.....	104
3.1.2.2.2-	Amortissement, θ	107
3.1.2.3-	Effet de l'organisation des charges.....	110
3.1.2.3.1-	Charge vs décharge.....	110
3.1.2.3.2-	Placement des jours de repos.....	112
3.1.2.3.3-	Décharge linéaire vs décharge exponentielle.....	113
3.2-	MATERIEL ET METHODE.....	115
3.2.1-	<i>Web-application "TrainingLoad Pro" © : présentation</i>	116
3.2.2-	<i>Utilisation</i>	117
3.2.2.1-	Identification.....	118
3.2.2.2-	Formulaire.....	120
3.2.2.2.1-	Adaptation automatique à la résolution de l'écran.....	123
3.2.2.2.2-	Interface graphique.....	123
3.2.2.3-	Santé.....	125
3.2.2.4-	Graphiques et tableaux.....	126
3.2.2.5-	Base de données.....	128
3.2.2.5.1-	Opérations sur la base de données.....	129

3.2.2.5.2- Paramétrage.....	130
3.3- SUJETS	131
3.3.1- <i>Collecte des données</i>	131
3.3.2- <i>Tests</i>	132
3.3.2.1- Introduction	132
3.3.2.2- Saut vertical.....	133
3.3.2.2.1- Sans élan.....	135
3.3.2.2.2- Avec élan, face au filet.....	136
3.4- ANALYSES STATISTIQUES	136
3.4.1- <i>Modélisation de la capacité de performance quotidienne</i>	136
3.4.2- <i>Mesure longitudinale des marqueurs</i>	137
3.4.2.1- Étape 1 : Analyses en Composantes Principales	138
3.4.2.2- Étape 2 : Rotation VARIMAX.....	138
3.4.2.3- Étape 3 : Classification Hiérarchique Ascendante	138
3.4.2.4- Étape 4 : Corrélations interclasses.....	138
3.5- RESULTATS	139
3.5.1- <i>Modélisation de la capacité de performance quotidienne</i>	139
3.5.2- <i>Comparaison avec le modèle de Banister et coll. (1975)</i>	141
3.5.3- <i>Suivi longitudinal des marqueurs perceptifs</i>	145
3.5.3.1- Analyse en composantes principales.....	145
3.5.3.2- VARIMAX.....	145
3.5.3.2.1- Cercle des corrélations.....	146
3.5.3.3- Classification hiérarchique ascendante.....	149
3.5.4- <i>Distribution</i>	153
3.5.4.1- Charge d'entraînement.....	153
3.5.4.1.1- Volume	155
3.5.4.1.2- Intensité (total et moyenne quotidiens).....	157
3.5.5- <i>Douleurs (localisation)</i>	159
4- DISCUSSION.....	162
4.1- OUTILS DE SAISIE ET DE TRAITEMENT DES DONNEES.....	163
4.2- CHARGE D'ENTRAINEMENT.....	166
4.2.1- <i>Niveau</i>	166
4.2.2- <i>Volume et intensité</i>	166
4.2.3- <i>Distribution hebdomadaire de la CE</i>	167
4.3- TESTS.....	170
4.4- MODELISATION	171
4.5- MARQUEURS.....	180

4.6-	PERSPECTIVES.....	187
CONCLUSION.....		188
BIBLIOGRAPHIE		191
PUBLICATIONS - VALORISATIONS.....		220
1)	VALEURS QUOTIDIENNES.....	260
4.7-	NOMBRE DE SEANCES.....	260
4.8-	CHARGE	260
4.9-	VOLUME.....	261
4.10-	INTENSITE MOYENNE	261
4.11-	INTENSITE MAXIMALE	262
4.12-	MAITRISE TECHNIQUE/TACTIQUE	262
4.13-	FATIGUE.....	263
4.14-	ENDORMISSEMENT	263
4.15-	SOMMEIL	264
4.16-	ÉTAT D'ESPRIT.....	264
4.17-	DOULEURS (TOTAL)	265
4.18-	DOULEURS (U.A./S).....	265
5-	HEBDOMADAIRE.....	266
5.1-	CHARGE	266
5.2-	VOLUME.....	267
5.3-	INTENSITE.....	267
5.4-	INTENSITE MAXIMALE.....	268
5.5-	MAITRISE TECHNIQUE/TACTIQUE	268
5.6-	ENDORMISSEMENT	269
5.7-	SOMMEIL.....	269
5.8-	ÉTAT D'ESPRIT	270
5.9-	FATIGUE	270
5.10-	DOULEURS (U.A./S).....	271
5.11-	DOULEURS (TOTAL)	271
5.12-	SEANCES	272
5.13-	VALEURS MOYENNES PAR SEANCE	272
LISTE DES TABLEAUX.....		273

LISTE DES FIGURES	277
ABSTRACT	280
KEY WORDS	280
RÉSUMÉ	282
MOTS CLES	282

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La capacité d'un sportif à accomplir des performances de haut niveau est la conséquence d'un long processus d'adaptation à l'entraînement et la compétition (Werchoschanski J.W., 1985³). La quantification des efforts et l'évaluation de leurs effets sur la performance constituent donc une des problématiques majeures de l'entraînement.

Basée essentiellement sur les principes de spécificité, de progressivité, d'alternance charge/décharge et de variété, la périodisation est en effet le premier acte stratégique de l'entraînement. L'organisation optimale des entraînements et des récupérations pour confronter le sportif à des contraintes toujours plus importantes est la condition indispensable à l'amélioration des performances.

Relativement simple pour le débutant, la périodisation de l'entraînement se complexifie avec le niveau d'expertise du sportif. Plus son niveau de pratique sera élevé, plus le sportif devra supporter des charges d'entraînement (CE) conséquentes, s'exprimant notamment à travers des stratégies de répartition de la CE innovante (Rhea et coll., 2002 ; Stöggl & Sperlich, 2014), la multiplication du nombre de séances quotidiennes et hebdomadaires (Bompa T.O., 1987⁴ ; Foster et coll., 1995) et des intensités d'efforts toujours plus importantes (Mujika I., 2010 ; Seiler S., 2010). Toutefois, une augmentation incontrôlée de la CE peut exposer le sportif expert aux risques de surmenage, de surentraînement, et dans les cas extrêmes de blessures (Piggott et coll., 2009 ; Gabbett & Jenkins, 2011).

Quantifier la CE semble d'autant plus important qu'il s'agit surtout pour l'entraîneur d'amener le sportif à ses pics de forme à des moments déterminés. La quantification de la CE participe alors à la maîtrise temporelle des adaptations du sportif à l'entraînement (Banister E.W., 1982 ; Banister & Calvert, 1980 ; Banister et coll., 1980, 1992 et 1999). Il est par conséquent indispensable d'étudier les effets des entraînements sur la capacité de performance, mais aussi d'analyser les interactions entre les périodes de

³ Page 36

⁴ Page 91

préparation et les périodes de compétitions, entre l'organisation hebdomadaire des séances d'entraînement et les périodes de récupération. Dans les sports collectifs, ces interactions et ces effets sont en effet fortement dépendants de l'agenda des compétitions (Manzi et coll., 2010).

L'évolution des enjeux sportifs (coupe d'Europe, accession au niveau supérieur ou maintien), mais aussi des enjeux économiques incite les clubs et les entraîneurs à compiler le plus de données possible pour mieux apprécier les capacités du sportif et réduire les risques d'échec ou de blessures. L'objectif premier est d'individualiser les processus d'entraînement à court, moyen et long termes. Ces données sont généralement issues d'analyses vidéo informatisées des compétitions (Kempton & Coutts, 2014), de l'utilisation de cardiofréquencemètre et de GPS (Jennings et coll., 2010). Cette collecte de nombreuses données individuelles nécessite des outils informatiques ergonomiques réellement utilisables quotidiennement dont certains restent encore à concevoir (Coutts A.J., 2014 ; Halson S.L., 2014).

Ces ensembles de données variées, concernant le plus souvent les domaines technique, tactique et/ou physique, deviennent avec le temps de plus en plus volumineux (Carling et coll., 2014) et il est alors difficile de toutes les analyser pour leur donner du sens. Cela nécessite par conséquent de redéfinir de nouvelles perspectives de collecte et de traitement. De nouveaux modèles de recueil et de représentation doivent être conçus pour permettre de restituer les analyses, notamment sous forme de tendances. Ils permettront de dégager les informations utiles des données brutes de l'activité du sportif, et de fournir à l'entraîneur un système destiné à faciliter le choix des stratégies de répartition hebdomadaires et annuelles des CE de leurs composantes (volume et intensité).

Pour répondre à ces interrogations, nous proposons dans un premier temps de présenter de manière la plus exhaustive possible les modèles et méthodes usuels mettant en relation CE et effets sur la performance. Nous nous attacherons à développer leurs apports et limites pour montrer leur degré d'adéquation à la réalité des pratiques compétitives de haut niveau en sports collectifs en vue de la conception et du développement d'un outil informatique ergonomique pour modéliser et gérer de l'entraînement avec une application au volleyball professionnel.

Un second temps s'attachera à la conception, au développement et à la validation d'un outil basé sur la modélisation sinusoïdale. Nous postulons :

1. que les variations de la capacité de performance ont un caractère cyclique, qui dépend de la CE (Costa et coll., 2012), et qu'elles peuvent conduire à une stratégie de répartition de la CE telle que la périodisation non linéaire (Prestes et coll., 2009 ; Monteiro et coll., 2009) ;
2. que cela nécessite un ajustement individuel de la modélisation des effets de l'entraînement.

Nous comparerons notre modélisation au modèle de Banister et coll. (1975) qui sert de référence dans beaucoup d'études sur la modélisation des effets de l'entraînement (Calvert et coll., 1976 ; Busso et coll., 1997, 2002 ; Busso, T., 2003).

Enfin, nous montrerons que la mesure longitudinale de différents marqueurs avec un système informatique en ligne ergonomique permet d'émettre un certain nombre de recommandations quant à l'utilisation et à l'optimisation de la quantification et la gestion de la CE chez le sportif de haut niveau. Marqueurs qui peuvent être potentiellement l'expression de représentations ayant une influence importante sur la capacité de performance (Piacentini & Meeusen, 2014).

Ces mesures sont d'autant plus importantes qu'en sports collectifs la période de compétition dure plusieurs mois et qu'un joueur ne peut pas maintenir un niveau de capacité de performance maximal sur une période aussi longue (Manzi et coll., 2010).

1- CADRE THÉORIQUE

« In modeling living systems, two pure strategies are available. In the first, referred to as an analytic strategy, a system is broken down into its constituent components, and each is described by applying the laws of physics and chemistry [...] The second, contrastingly referred to as the black-box strategy, makes no assumptions about the constituents of the system and only considers input-output relationships. »

Calvert et coll., 1976, page 97

Dans ce chapitre

1.1 - PREAMBULE	21
1.2 - AUTOREGULATION	26
1.3 - SYSTEME ENTRAINEMENT-PERFORMANCE.....	29
1.4 - MARQUEURS MECANIQUES, BIOLOGIQUES ET/OU SUBJECTIFS	58
1.5 - SYNTHÈSE	80

Publication : Morin, S., Ahmaidi, S. & Leprêtre, P.M. (2014). Modélisation des effets de l'entraînement : revue des différentes études. *Science & Sports*, 9 (5) : 237-247.

À l'instar des analystes financiers qui tentent de prévoir le cours d'une action pour étoffer un portefeuille boursier, les entraîneurs s'interrogent souvent sur la conception d'un outil pragmatique, fiable et sensible, permettant de quantifier la CE pour mieux maîtriser ses effets sur la performance aux différentes périodes de l'année.

Les performances ont considérablement progressé ces dernières décennies. Des niveaux souvent inimaginables avant sont maintenant communs. Le nombre de sportifs capables de résultats de haut niveau augmente régulièrement ce qui accentue la concurrence dans les différentes compétitions et impose une précision et une fréquence des pics de forme exacerbées. La réalisation de ces performances de haut niveau repose alors sur la conception d'un plan d'entraînement qui permet aux sportifs d'augmenter et d'organiser le plus efficacement possible un nombre très important de séances pendant plusieurs années. Mais un calendrier des compétitions toujours plus dense, les déplacements associés aux compétitions et la succession de nombreux entraînements peuvent provoquer à une augmentation de la fatigue qui, si elle n'est pas contrôlée, peut être préjudiciable aux adaptations souhaitées (Homery et coll., 2007) et conduire au surmenage ou au surentraînement (Meeusen et coll., 2013). D'autant plus si la récupération est perturbée par les nombreuses activités de leurs vies familiales, sociales et médiatiques.

Il devient alors indispensable d'organiser les variations de la CE dans un certain ordre chronologique au cours de séquences permettant d'atteindre le niveau d'aptitude prévue aux moments souhaités pour bénéficier des effets cumulés de l'entraînement (Werchoschanski J.W., 1985⁵). Traditionnellement, cette répartition dans le temps se subdivise en cycles de différentes durées (microcycle, mésocycle, macrocycle, périodes) afin de tenir compte du calendrier des compétitions, de l'inertie des différents systèmes biologiques sollicités (Weineck J., 1983⁶ ; Werchoschanski J.W., 1985⁷ ; Kelly & Coutts, 2007 ; Bompa & Haff, 2009⁸), et de leurs interactions. Mais aussi de la tolérance personnelle du sportif à ces CE, c'est-à-dire de sa capacité à mobiliser ses propres ressources pour répondre aux différentes sollicitations des séances d'entraînement et de sa capacité à récupérer (Calvert et coll., 1976 ; Morton R.H., 1997 ; Mester & Perl, 1999).

⁵ Page 135

⁶ Page 307

⁷ Page 129

⁸ Page 165

Chaque cycle peut avoir comme objectif spécifique l'entretien ou le développement d'une compétence spécifique (vitesse, endurance, force, souplesse, coordination), mais également la préparation à la compétition (par exemple, l'affûtage).

Par-delà le contenu des séances (préparation physique, technique et/ou tactique), l'entraînement implique la manipulation de trois principales variables (Smith D.J., 2003) : le volume, l'intensité et la fréquence. Le volume représente la variable quantitative alors que l'intensité caractérise la variable qualitative de la CE. Les influences respectives de chacune d'elles sur la performance dépendent du niveau du sportif, mais aussi du sport pratiqué et font l'objet de nombreuses publications (Esteve-Lanao et coll., 2007 ; Laursen P.B., 2010 ; Mujika I., 2010). La fréquence se définit comme le nombre de séances d'entraînement par unité de temps. Elle est étroitement liée à la durée de l'intervalle de récupération entre les séances qui favorise les réactions de régulation provoquées par l'entraînement (Busso et coll., 2002 ; Weineck, J., 1983⁹). Pour atteindre un haut niveau de performance, il a été clairement établi que les stratégies de variations de la CE, de volume et d'intensité devaient être systématisées et structurées (Werchoschanski J.W., 1985¹⁰ ; Foster C., 1998 ; Bompa & Haff, 2009¹¹ ; Issurin V.B., 2008 et 2010), et que la réponse individuelle du sportif à la CE imposée par le plan devait être mesurée. Foster et coll. (2001a) et Anderson et coll. (2003) notent ainsi qu'un sportif est exposé à un risque accru d'infections et de blessures lors d'une forte monotonie¹² de l'entraînement ou d'une forte augmentation de la CE.

⁹ Page 23

¹⁰ Page 102

¹¹ Page 79

¹² Monotonie : Selon Foster C. (2001), c'est le quotient de la moyenne des CE hebdomadaires et de l'écart-type des CE quotidiennes. C.f. page 71.

1.1- PREAMBULE

1.1.1- Charge d'entraînement

Les blessures sont la conséquence d'interactions complexes entre des facteurs internes et/ou externes et est alors souvent perçue comme le risque le plus important (McCall et coll., 2015). Plusieurs études ont en effet mis en évidence les relations étroites entre blessures et CE (Anderson et coll., 2003 ; Gabbett T.J., 2004, Gabbett & Domrow, 2007 ; Gabbett & Jenkins, 2011).

Le concept de CE, comme précurseur de la fatigue, nécessite alors d'être précisée, tant il constitue le socle de la périodisation de l'entraînement qui vise à pouvoir maîtriser et prédire les effets des différents entraînements, et à définir les stratégies d'organisation hebdomadaires des CE pendant les périodes de préparation et les périodes de compétition.

Empiriquement, les entraîneurs font très souvent référence à Werchoschanski J.W. (1985) qui, pour déterminer « *la charge de développement optimale* », se fonde sur la mesure « *des valeurs qualitatives et quantitatives qui déterminent l'effet de la charge d'entraînement sur l'organisme du sportif*¹³ ». Werchoschanski J.W. (1985) précise que la notion de CE suppose un niveau d'effet sur l'organisme, intervenant dans les conditions d'un travail spécifique et se traduisant dans l'organisme sous la forme de réactions qui ont une certaine amplitude et une certaine durée.

Généralisée, la CE peut donc se définir comme le concept qui représente ce que coûte l'activité au sportif qui la pratique, ce qui fait qu'elle est traditionnellement une mesure objectivée. Elle est par conséquent le résultat de l'interaction entre les exigences de l'activité et les circonstances dans lesquelles sont mobilisées les aptitudes et les capacités du sportif. La CE peut alors être envisagée comme l'effort que fait le sportif pour répondre aux exigences de l'entraînement, ce qui implique une évaluation de l'effort quant à la mobilisation de ses capacités mais aussi de la motivation pour faire cet effort. Quantifier la CE améliore la précision de la mesure des effets immédiats, différés et cumulés des différentes stratégies d'organisation de la CE au cours de séquences données (microcycles,

¹³ Page 102

mésocycles, macrocycles, périodes).

Deux paramètres essentiels permettent de la définir : le volume et l'intensité.

1.1.2- Volume

Selon Werchoschanski J.W. (1985), « *le volume de la charge d'entraînement exprime l'aspect quantitatif des moyens d'entraînement*¹⁴ ». Deux unités de mesure sont généralement privilégiées : la distance et le temps. Les auteurs d'études menées en natation utilisent principalement les distances. Avec des nageurs de haut niveau, Mujika et coll. (1996) utilisent les kilomètres comme unités de volume. Mais dans la très grande majorité des recherches, le volume est exprimé en durée (Banister & Calvert., 1980 ; Morton et coll., 1990 ; Edwards S., 1993 ; Foster et coll., 1995 ; Lucia et coll., 2003 ; Wood et coll., 2005).

Les effets positifs du volume sur la performance ont beaucoup été étudiés et concernent particulièrement les acquisitions techniques (Stewart & Hopkins, 2000), l'économie de course (Wakayoshi et coll., 1993), les capacités oxydative et glycolytique du muscle - indirectement par la mesure du taux de lactate sanguin (Gorostiaga et coll., 1991), l'adaptation à long terme du niveau de performance (Counsilman & Counsilman, 1991), le développement de la force (Kawamori & Haff, 2004).

Toutefois, Mujika et coll. (1995) montrent une absence de corrélation entre le volume d'entraînement et l'amélioration de la performance au cours d'une saison sportive chez des nageurs de niveau élite. Gaskill et coll. (1999) notent même une stagnation de la consommation maximale d'oxygène chez des skieurs de fond. Les sujets sédentaires et faiblement entraînés seraient les principaux bénéficiaires de l'augmentation du volume d'entraînement en termes d'amélioration des performances. A contrario, l'augmentation du volume d'entraînement élèverait les risques de surentraînement chez le sportif déjà bien entraîné (Fry et coll., 1991). Viljoen et coll. (2010) trouvent que la réduction du volume d'entraînement est associée avec une légère baisse du nombre de blessures chez des rugbymen au cours de trois saisons.

Pour les sportifs de haut niveau, le volume semble être un marqueur à suivre en

¹⁴ Page 109

relation étroite avec les douleurs et les blessures pour éviter le surentraînement, le surmenage ou le désentraînement, notamment dans les sports collectifs où la concurrence physique est déterminante (Williams et coll., 2014).

Néanmoins, les limites entre volume et intensité ne sont pas toujours explicites. Calvert et coll. (1976) utilisent ainsi des multiples de 100 mètres pour exprimer le volume en natation. Les séances de musculation sont assimilées à un kilomètre de nage à haute intensité.

1.1.3- Intensité

Werchoschanski J.W. (1985) précise que « *le potentiel efficace d'entraînement d'une charge exprime l'intensité de son action sur l'état du sportif*¹⁵ ». L'intensité est le paramètre qui s'exprime le plus différemment, sans doute parce qu'il est fortement dépendant des systèmes énergétiques prédominants, des contraintes d'investigation et de la variété des types de séances d'entraînement.

Les basses et les hautes intensités sont deux paramètres importants de l'entraînement des sportifs qui pratiquent un sport où elles peuvent beaucoup varier (sports collectifs, sports de raquette) (Buchheit & Laursen, 2013a et 2013b). Les joueurs doivent enchaîner des efforts, intenses à très intenses, répétés, de quelques secondes, avec des efforts moins intenses de plusieurs dizaines de secondes, faisant varier les parts relatives des mécanismes de resynthèse anaérobie et aérobie de l'adénosine triphosphate au cours du temps (Buchheit & Laursen, 2013a et 2013b). Améliorer la compétence de ces sportifs consiste à leur donner, en valeur cumulée, la possibilité de maintenir et augmenter la durée d'effort dans chaque zone d'intensité.

Plusieurs études ont montré que l'intensité était un critère plus influant sur la performance que le volume (Mujika et coll., 1995 ; Foster et coll., 1999 ; Laursen & Jenkins, 2002 ; Smith D.J., 2003 ; Laursen P.B., 2010). Laursen & Jenkins (2002) et Laursen P.B. (2010) ont montré que cinq semaines d'entraînement à haute intensité induisaient une amélioration des performances en compétition chez de jeunes nageurs. Ils notent que les volumes à haute intensité sont préférables à de hauts volumes à basse

¹⁵ Page 107

intensité. Smith D.J. (2003) a noté des améliorations de performances chez des coureurs de 3000 mètres après deux entraînements par semaine d'interval-training à haute intensité pendant quatre semaines. Mujika et coll. (1995) trouvent également que l'intensité moyenne sur une saison est le paramètre qui explique le plus les améliorations de la performance ($r=0,69$, $P<0,01$) et non le volume ou la fréquence d'entraînement.

Les causes tiennent à l'amélioration des seuils ventilatoires (Hoogeveen A.R., 2000), des seuils lactiques (Driller et coll., 2009), du débit cardiaque (Daussin et coll., 2007) ou de la capacité à mobiliser une masse musculaire plus importante (Creer et coll., 2004). Il a été démontré que les basses intensités étaient suffisantes pour provoquer des adaptations mitochondriales dans les fibres lentes, mais que de hautes intensités étaient nécessaires pour induire des adaptations analogues au niveau des fibres rapides (Dudley et coll., 1982 ; Daussin et coll., 2008 ; Todd et coll., 1996).

L'intensité semble être un facteur déterminant de l'entraînement. La réduction de la CE en période d'affûtage destinée à faciliter la dissipation de la fatigue pour être plus performant semble nettement plus efficace si l'intensité reste constante alors que le volume est réduit (Mujika I., 2010). Le volume semble par conséquent être le modérateur le plus important de la performance.

1.1.4- Interactions volume-intensité

Dans la littérature scientifique récente sur les sports à dominante aérobie, il est de plus en plus recommandé de privilégier l'entraînement à haute intensité plutôt que d'importants volumes d'entraînement (Berg K., 2003 ; Neal et coll., 2013). Laursen P.B. (2010) montre qu'un entraînement polarisée¹⁶, où environ 75 % du volume total sont réalisés à haute intensité et 10 à 15 % sont réalisés à de très hautes intensités, semble être la stratégie optimale de distribution de la CE pour les sportifs de haut niveau pratiquant les sports à dominante intermittente. Seiller S. (2010) note toutefois que chez les coureurs d'épreuves à dominante aérobie de niveaux national et international s'entraînant entre dix et treize fois par semaine, 80 % des séances sont réalisées à une intensité inférieure à 2mmol.l^{-1} de lactate. Les 20 % restant sont constitués d'entraînement à des intensités

¹⁶ Entraînement polarisé : concept qui consiste à éviter les intensités d'entraînement moyennes et à privilégier les intensités hautes et basses (qui se situent aux extrêmes, aux « pôles »)

supérieures à 90 % de la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2 \text{ max}$)¹⁷. Il note également qu'aucune étude scientifique n'apporte de preuves suffisamment convaincantes que mettre davantage l'accent sur l'entraînement à haute intensité permet d'améliorer la performance à long terme chez des athlètes de haut niveau. Esteve-Lanao et coll. (2007) montrent en effet que, chez des coureurs de 5000 mètres de niveau national, un entraînement de plusieurs mois à basse intensité apporte de plus grandes progressions qu'un entraînement à intensité modérée.

La problématique ne semble donc pas se situer uniquement en termes de déclinaisons des paramètres de la CE à privilégier (haute intensité vs basse intensité, volume vs intensité), mais plutôt en termes de structuration (Rønnestad et coll., 2012a et 2012b, Simão et coll., 2012 Simão) et de planification à moyen et long termes de ces mêmes déclinaisons. En effet, dans l'étude de Quinn et coll. (2006), deux groupes (GC et GI) ont réalisé pendant douze semaines un entraînement continu (une fois trente minutes par jour) pour un GC, et un entraînement intermittent (deux fois quinze minutes par jour) pour GI à une même intensité de 70 %-80 % de la fréquence cardiaque de réserve. Au terme de la période d'entraînement, les deux groupes ont inversé leur méthode d'entraînement pour une nouvelle séquence de douze semaines d'entraînement. Les améliorations de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ étaient respectivement de 4,5 % pour GC et 8,7 % pour GI à la fin de la première période et de 3,6 % pour GC et de 7,7 %, pour le GI à la fin de la seconde période. Les résultats suggèrent que l'entraînement intermittent semble plus bénéfique lorsqu'il est précédé d'un entraînement continu, car c'est le groupe qui a fait l'intermittent en dernier qui a la plus forte progression. Cela pourrait aussi expliquer pourquoi, dans la plupart des études qui remplacent une partie de l'entraînement à faible ou moyenne intensité par une partie à haute intensité, les performances sont nettement améliorées. Ces interactions nécessitent d'être prise en compte.

De plus, Laursen P.B. (2010) note qu'avec une pratique importante d'important volume d'entraînement à basse intensité, l'entraînement à haute intensité permet à un sportif de maintenir son niveau de performance, mais rarement de l'améliorer.

¹⁷ Consommation maximale d'oxygène : «Débit d'oxygène consommé par minute qui reflète la capacité à resynthétiser l'ATP par les processus oxydatifs. » (Billat V., 2003, page 201).

1.2- AUTOREGULATION

La grande majorité des études sur les effets de l'entraînement s'inscrit dans les recherches en cybernétique, qui consistent à considérer le corps humain comme un système autorégulé. Il ne s'agit pas tant de s'intéresser aux composantes qu'à leurs relations. Selon la conception de Wiener N.¹⁸, l'élément central est une boîte noire (le corps humain) dont est déduite sa fonction apparente à partir de l'étude de ses entrées (l'entraînement) et ses sorties (la performance) (figure 1, page 25).

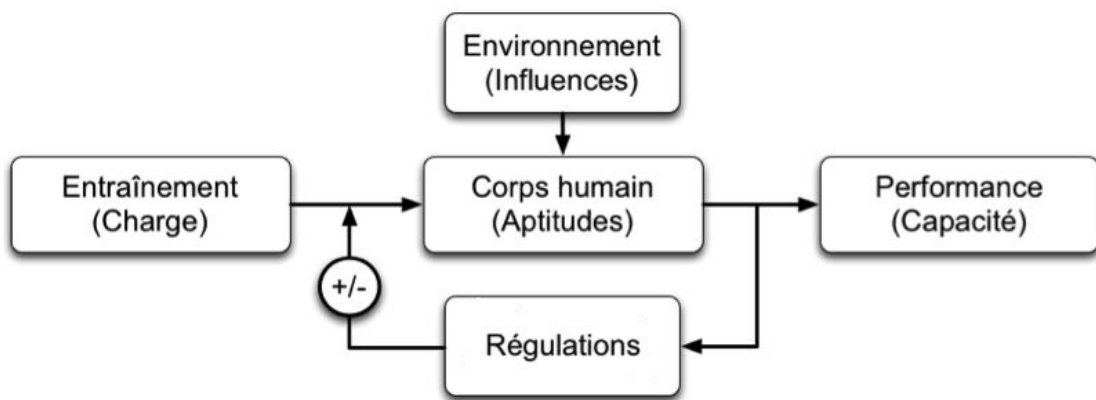


Figure 1 : Approche cybernétique des effets de l'entraînement. La performance est dépendante de l'entraînement, d'influences externes de l'environnement et de régulations internes (+/- : rétroactions positives ou négatives).

Toutes les modélisations des effets de l'entraînement utilisent les fonctions de transfert¹⁹ pour tenter de représenter les relations entre les entrées et les sorties. Dans l'approche cybernétique, le principe fondamental est de considérer que les effets de l'entraînement sont transitoires, car fonction du temps et des interactions entre différents facteurs exogènes et endogènes. Une boucle de rétroactions positives et négatives est alors indispensable pour permettre une autorégulation qui prenne en compte les changements de l'environnement et la réalité des capacités du sportif. Cela signifie que pour un même sportif une même séance d'entraînement à différentes périodes ne produit pas systématiquement les mêmes adaptations.

¹⁸ Wiener Norbert (1894-1964) : mathématicien, fondateur de la cybernétique et de la notion de rétroaction (« feedback »)

¹⁹ Fonction de transfert : modèle mathématique de la relation entre l'entrée et la sortie d'un système. Les fonctions d'entrée et de sortie peuvent avoir plus composantes mais peuvent ne dépendre que du temps.

Quantifier la CE doit donc permettre de définir les limites :

- de sous-charge, c'est-à-dire lorsque le sportif ne s'entraîne pas suffisamment pour maintenir son niveau de performance, amenant à un état de désentraînement (Bosquet & Mujika, 2012 ; Bosquet et coll., 2013) ;
- de surcharge, c'est-à-dire lorsque les exigences de l'entraînement dépassent les capacités du sportif. Ce qui augmente le niveau de fatigue et influence les effets désirés des entraînements en favorisant potentiellement l'apparition d'un état de surmenage ou de surentraînement (Kawamori & Haff, 2004 ; Taha & Thomas, 2003 ; Borresen & Lambert, 2007 et 2008).

Ces notions de limites de sous-charge et de surcharge conduisent les entraîneurs à s'interroger sur le niveau optimal de CE nécessaire à chaque sportif aux différentes périodes de la planification de l'entraînement pour 1) améliorer son niveau de performance et surtout 2) le synchroniser avec les périodes choisies (par exemple les compétitions) (Mujika I., 1998 ; Mujika & Padilla, 2001).

À RETENIR

La grande majorité des études sur les effets de l'entraînement s'inscrit dans les recherches en cybernétique, qui consistent à considérer le corps humain comme un système autorégulé.

Les effets de l'entraînement sont alors considérés comme un état non définitif des interactions entre différents facteurs exogènes et endogènes, ce qui signifie qu'une même séance d'entraînement à différentes périodes ne produit pas les mêmes adaptations chez un même sportif.

La CE, valeur d'entrée du système, suppose un niveau d'effet sur l'organisme, intervenant dans les conditions d'un entraînement spécifique et se traduisant dans l'organisme sous la forme de réactions, s'exprimant par une performance, valeur de sortie du système.

La CE peut donc être envisagée comme l'effort que fait le sportif pour répondre aux exigences de l'entraînement, ce qui implique une évaluation de l'effort quant à la mobilisation de ses capacités et de la motivation pour faire cet effort.

Quantifier la CE améliore donc la précision de la mesure des effets immédiats et différés des différents entraînements.

Les deux paramètres essentiels permettant de définir la CE sont le volume et l'intensité, et ce sont leurs différentes stratégies d'organisation de la programmation d'entraînement qui permettront d'améliorer la performance au moment souhaité.

1.3- SYSTEME ENTRAINEMENT-PERFORMANCE

Les relations entre CE et performance sont le plus souvent le résultat de constats empiriques parce qu'il est difficile de quantifier précisément le volume et l'intensité. C'est un obstacle majeur à une réelle quantification de la CE. Il est intéressant de noter qu'il y a quarante ans, Calvert et coll. (1976) soulignaient qu'il était « *irréaliste* » d'effectuer des mesures physiologiques en routine quotidienne, et pointaient l'importance de la prise en considération des perceptions du sportif, mais aussi de la nécessité d'améliorer la sensibilité des valeurs d'entrée du modèle biocybernétique (figure 1).

Déterminer l'unité de compte qui devrait permettre de normaliser les CE, le volume et l'intensité d'activités physiques (aux caractéristiques énergétiques, neuromusculaires et psychoaffectives différentes) devient alors une priorité de la quantification de la CE.

Les relations entre CE et performance s'expriment alors le plus souvent au prisme de la fatigue produite par l'accumulation des entraînements. Accumulation qui se traduit à terme par une dégradation du niveau de performance (Hooper et coll., 1995 ; Hooper & McKinnon, 1995). Cette fatigue concerne aussi bien les aspects physiologiques (potentiel énergétique et neuromusculaire) que psychologiques (stress, l'état d'esprit, la motivation, l'investissement de soi). Elle est le plus souvent une conséquence à court, moyen et long termes des relations entre CE et phases de récupération s'exprimant par des symptômes objectifs et subjectifs (variations des performances, signes physiologiques d'un déséquilibre de l'homéostasie, modifications de l'humeur).

La récupération, qui est l'activité (ou l'absence d'activité) favorisant les adaptations physiologiques et psychologiques, est alors un pondérateur important de la fatigue ; fatigue qui a est le modulateur d'amplitude de la performance des premiers modèles cybernétiques des effets de l'entraînement du milieu des années 70 (Calvert et coll., 1976).

1.3.1- Modèle original : aptitude et fatigue

Banister et coll. (1975) et Calvert et coll. (1976) sont les premiers à formaliser un modèle qui relie au même instant, entraînement (en entrée) et performance (en sortie). La réponse à l'entraînement est régie mathématiquement par une équation de la forme :

$$p(t) = ke^{\frac{-t}{\tau}} \quad (\text{Équation 1})$$

Où $p(t)$ est la performance à l'instant t (t est le numéro du jour - valeur 0 pour le premier jour du plan), k est un coefficient de pondération et τ une constante de temps.

Leur modèle, présenté en figure 2, est composé de deux équations différentielles de premier ordre, représentant deux éléments opposés : l'aptitude et la fatigue.

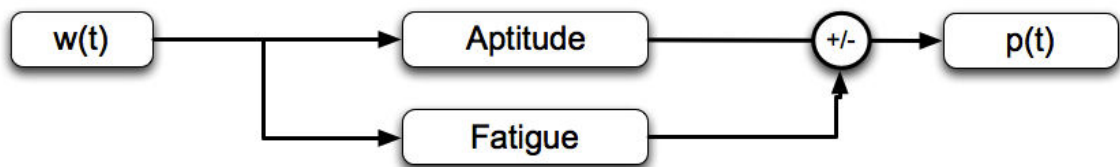


Figure 2 : Modèle à deux composants de Banister et coll. (1975). $w(t)$ est l'entraînement exprimé en unités arbitraires (u.a.), $p(t)$ est la performance et $+/-$ représente l'influence négative ou positive de la fatigue.

L'aptitude est estimée par l'équation :

$$Aptitude(t) = \left(e^{\frac{-t}{\tau_1}} - e^{\frac{-t}{\tau_2}} \right) \times w(t) \quad (\text{Équation 2})$$

Où τ_1 et τ_2 sont des constantes de temps, arbitrairement fixées à 50 et 5 jours respectivement, puis redéfinies par itération, et $w(t)$ l'entraînement exprimé en unités arbitraires (u.a.). Toute augmentation du niveau d'aptitude influence positivement le niveau de performance $p(t)$.

La fatigue est estimée comme :

$$Fatigue = ke^{\frac{-t}{\tau_3}} \times w(t) \quad (\text{Équation 3})$$

Où k est une constante qui a pour valeur par défaut 2 et τ_3 , 15 jours.

À l'inverse de l'aptitude, le niveau de fatigue influence négativement le niveau de performance. Un produit de convolution de deux fonctions estime le niveau de performance comme le produit d'un entraînement et d'un élément filtrant de premier ordre de type exponentiel qui vise à simuler la cinétique de dissipation retrouvée chez certains marqueurs biologiques humains (Doherty et coll., 2003) (équation 4).

$$p(t) = \left[\left(e^{\frac{-t}{\tau_1}} - e^{\frac{-t}{\tau_2}} \right) - k e^{\frac{-t}{\tau_3}} \right] \cdot w(t) \quad (\text{Équation 4})$$

1.3.1.1- Fatigue et performance

La différence entre l'aptitude et la fatigue permet d'expliquer l'amélioration de performance. L'originalité principale de cette modélisation réside dans l'influence de la fatigue sur la performance.

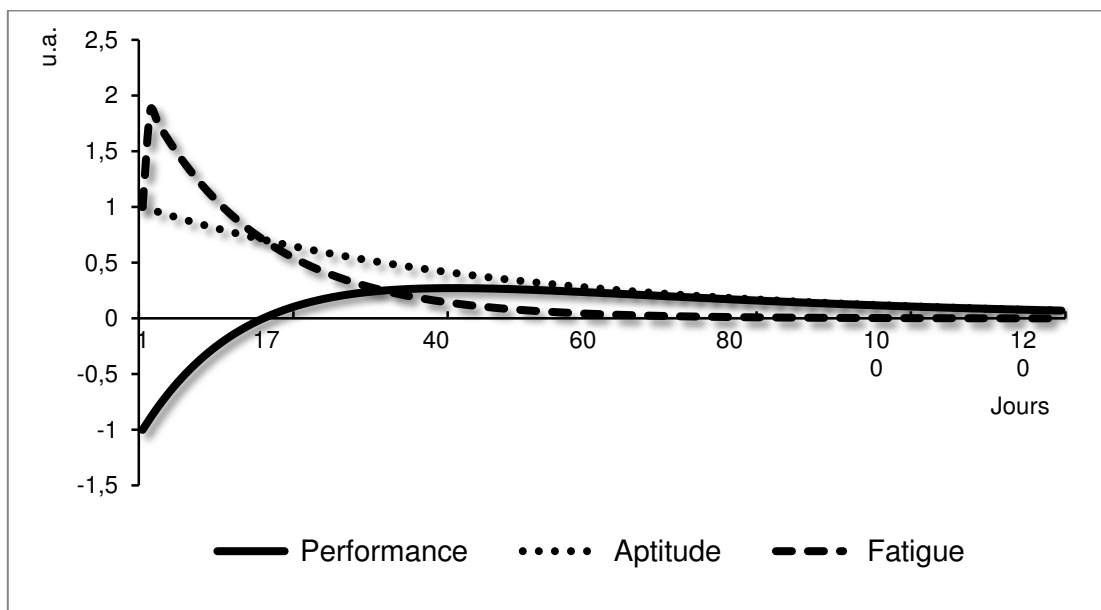


Figure 3 : Variation de la performance selon le modèle de Banister et coll. (1975) pour une unique CE de 1 u.a.

Par exemple, pour une CE unique de 1 u.a. les effets de l'aptitude sont supérieurs aux effets de la fatigue à partir du dix-septième jour, ce qui se traduit à ce moment par une élévation du niveau de performance (figure 3).

En comparant les performances de leurs sujets sur deux saisons (1970-71 et 1973-

74), Calvert et coll. (1976) constatent que l'effet de la fonction fatigue sur la performance est presque identique d'une saison sur l'autre alors que l'effet de la fonction aptitude est quatre fois inférieur. Cela tend à montrer que les effets positifs de l'entraînement diminuent, d'autant plus que le sportif devient expert. A contrario, les effets indésirables, c'est-à-dire la part relative de la fatigue, augmentent.

La mesure de la fatigue consécutive à l'entraînement, sous quelques formes que ce soit, est donc un élément fondamental des stratégies de planification et peut être considérée comme un marqueur du rapport charge-décharge, c'est-à-dire du rapport entraînement-récupération (Borresen & Lambert, 2007 et 2008 ; Buchheit et coll., 2007 ; Buchheit et coll., 2008 ; Lamberts et coll., 2010).

Halson et coll. (2002) ont montré par exemple qu'un état de surentraînement peut débiter après sept jours d'entraînement intense avec une récupération limitée. La baisse significative de performance était accompagnée d'une baisse de 9,3% de la fréquence cardiaque, de 5% de la consommation maximale d'oxygène et de 8,6% de la perception de l'effort. Il n'y avait cependant pas de changements au niveau de l'efficacité technique, du lactate, de l'urée plasmatique, de l'ammoniacque et des concentrations des catécholamines.

Au plan psychoaffectif, des six facteurs du Profile of Mood States (POMS²⁰), les scores de l'échelle de vigueur et de l'échelle de fatigue semblent suivre les changements de la CE (O'Connor et coll., 1989 et 1991).

Odagiri et coll. (1996) notent que c'est l'indice d'énergie (rapport du score de vigueur sur le score de fatigue) qui est le plus corrélé avec les changements des taux d'hormones endocrines. Kenttä et coll. (2006) montrent que l'indice d'énergie varie plus que l'échelle de perception de l'effort chez des kayakistes élités et qu'il est important de planifier de manière appropriée la fréquence et la durée de la récupération pour maintenir un équilibre suffisant entre le score de vigueur et le score de fatigue durant les périodes d'entraînement intensif.

Martin et coll. (2000) ont montré également que le score de fatigue du POMS augmente graduellement avec l'augmentation de l'intensité de l'entraînement sur des

²⁰ Profile of Mood States (Profil des états d'humeur). McNair, D.M., Lorr, M., & Droppleman, L.F., 1971 © 1971, 1981, 1992, 2003 by Multi-Health Systems Inc.

périodes de cinq et six semaines.

Hooper et coll. (1997), dans une étude sur un suivi d'une année, montrent que pour des nageurs, la cotation subjective du sommeil et de la fatigue sur une échelle de 1 à 7 permettait de prédire à mi-saison le score de fraîcheur dès lors qu'ils inscrivaient une valeur supérieure à 5 plus de sept jours consécutifs.

1.3.1.2- Performance en sports collectifs

Le modèle originel et ses déclinaisons ont été utilisés dans les activités physiques individuelles comme le marathon (Banister & Hamilton, 1985 ; Morton et coll., 1990), la natation (Calvert et coll., 1976), l'haltérophilie (Busso et coll., 1990), le lancer de marteau (Busso et coll., 1991) et le ski de fond (Candau et coll., 1992). La mesure de la performance s'exprime alors en unité de temps, de distance, ou de masse. Dans ces sports individuels, la quasi-totalité des séances ainsi que la performance peuvent être en effet plus facilement quantifiées avec un chronomètre et/ou un décamètre. Peu de séances nécessitent un transcodage en unité arbitraire (Calvert et coll., 1976 ; Busso et coll., 1991).

Les études scientifiques n'ont par conséquent pas investigué les sportifs collectifs où la performance ne peut s'objectiver en ces termes. Comme le souligne Bocquet V. (2002), les premiers « *modèles estimant la performance (...) ont été appréhendés à partir de records du monde ou à partir des composantes physiologiques de sportifs*²¹ ». Et « *ces modèles ont toujours eu comme objectif d'expliquer cette relation vitesse-temps* ».

Tel ne peut être le cas en sports collectifs où la performance est un total de points, résultat d'actions collectives très dépendantes de la compétence de l'adversaire et des enjeux de la partie (Marcellino et coll., 2011). Les points acquis à la fin du match ne peuvent donc être utilisés comme marqueur de la performance individuelle du joueur.

Dans ces activités à dominante technico-tactique, l'analyse des exigences est beaucoup plus qualitative que quantitative et conduit à deux stratégies : 1) faire référence aux avis des techniciens experts sur les qualités qu'ils jugent indispensables pour atteindre

²¹ Thèse, Introduction page 11

le haut niveau, ou 2) réaliser une analyse détaillée, souvent au moyen d'outils (caméra, GPS, cardiofréquencemètre...), pour discriminer les actions suivant différents critères (nombre, durée...) pour retrouver cette relation vitesse/temps.

Mais la subjectivité, le nombre conséquent de données à traiter que cela implique, les contraintes du haut niveau, les règlements des compétitions et la forte dépendance à la précision des instruments de mesure limitent leurs usages en tant que marqueur de la performance.

« En définissant la performance comme le résultat perçu et évalué, nous supposons qu'il peut être situé sur une échelle ordinale de quantité (...) ou de qualité (...) et qu'il est aussi comparé à d'autres résultats. » La compétition n'est donc pas obligatoirement le marqueur unique. La performance fait *« référence à un résultat situé sur un continuum évaluatif²² »* (Famose J.P., 1993). Utiliser ce modèle en sports collectifs pourrait supposer de choisir une tâche qui soit caractéristique de l'activité de compétition en intégrant les exigences essentielles de l'activité.

²² Page 28

À RETENIR

L'intérêt majeur de la conceptualisation de Banister et coll. (1975) et Calvert et coll. (1976) est de déterminer par un modèle simple la performance comme la différence entre les influences positives (aptitude) et les influences négatives (fatigue) générées par l'entraînement dont les proportions respectives évoluent suivant des constantes de temps différentes.

Elle pose le problème des relations entre l'aptitude et la fatigue, mais aussi indirectement celui de la définition de la CE (valeur d'entrée) et de la modélisation de la performance, notamment en sports collectifs (valeur de sortie).

L'accumulation de la CE provoque donc dans des proportions différentes une augmentation de l'aptitude, mais aussi une augmentation de la fatigue.

Banister et coll. (1975) et Calvert et coll. (1976) mettent ainsi en évidence, sans la prendre et compte dans leur modèle, un concept fondamental de l'entraînement : la récupération, comme modulateur du niveau de performance.

1.3.1.3- Régularité des entraînements

Morton et coll. (1990) simplifient le modèle de Calvert et coll. (1976) en ne conservant que le paramètre τ_1 pour l'aptitude (figure 4). Dans le cas de CE continues de 1 u.a. sans journée de repos, la performance dépassera son niveau initial à partir du quarante-huitième jour (figure 4).

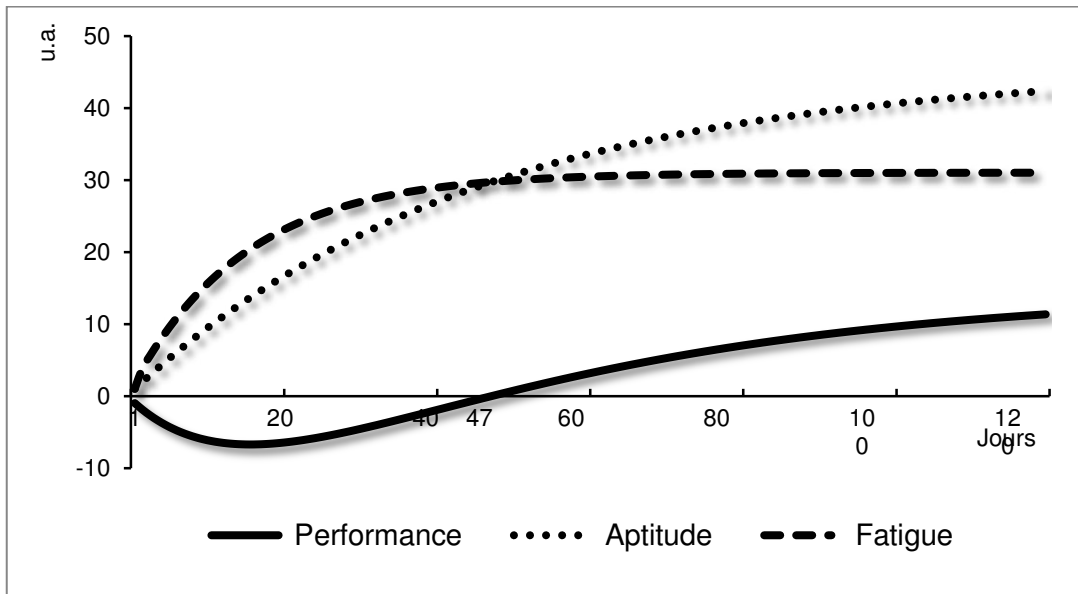


Figure 4 : Variation de la performance selon le modèle de Morton et coll. (1990) pour des CE continues de 1 u.a., avec $k_1=1$ et $k_2=2$

Morton et coll. (1990) intègrent surtout un paramètre important : la durée entre deux séances (c'est-à-dire la récupération). Ils pondèrent également chaque composant par une constante, respectivement k_1 et k_2 qui n'ont pas de fondement physiologique, mais ajuste par itération le modèle aux caractéristiques personnelles du sportif, telle que la performance puisse être modélisée par l'équation :

$$p(t) = k_1 \cdot g(t) - k_2 \cdot h(t) \quad (\text{Équation 5})$$

Où t est le jour d'entraînement, $p(t)$ est le niveau de performance au jour t , $g(t)$ et $h(t)$, exprimés en u.a. représentent les niveaux d'aptitude et de fatigue, respectivement.

Une valeur importante de k_2 indique que le sportif a besoin de beaucoup de temps pour récupérer. Inversement, une valeur de k_1 élevée indique que le sportif récupère relativement rapidement.

Dans cette modélisation, les paramètres d'aptitude et de fatigue sont récursivement calculés à chaque séance. L'aptitude (équation 6) et la fatigue (équation 7) sont estimées par deux équations exponentielles :

$$g(t) = g(t - i) \cdot e^{\frac{-i}{\tau_1}} + w(t) \quad (\text{Équation 6})$$

$$h(t) = h(t - i) \cdot e^{\frac{-i}{\tau_2}} + w(t) \quad (\text{Équation 7})$$

Où $g(t)$ et $h(t)$ sont exprimés en u.a., t est le jour d'entraînement, i est la période entre deux entraînements (en jours), τ_1 et τ_2 les constantes de temps de l'aptitude et de la fatigue.

Les coefficients pondérateurs (k_1 , k_2) et la durée de la période i entre deux stimuli sont deux concepts importants : ils mettent en évidence 1) la nécessité d'individualiser la quantification de la CE et 2) la dépendance du niveau de performance à la durée séparant chaque entraînement. La récupération est un processus individuel, de durée variable, qui conduit à ce qu'un même entraînement ne produit pas le même effet en fonction du nombre de jours de récupération qui le précède. C'est d'autant plus important que très souvent les sportifs de haut niveau n'ont qu'un jour de repos par semaine.

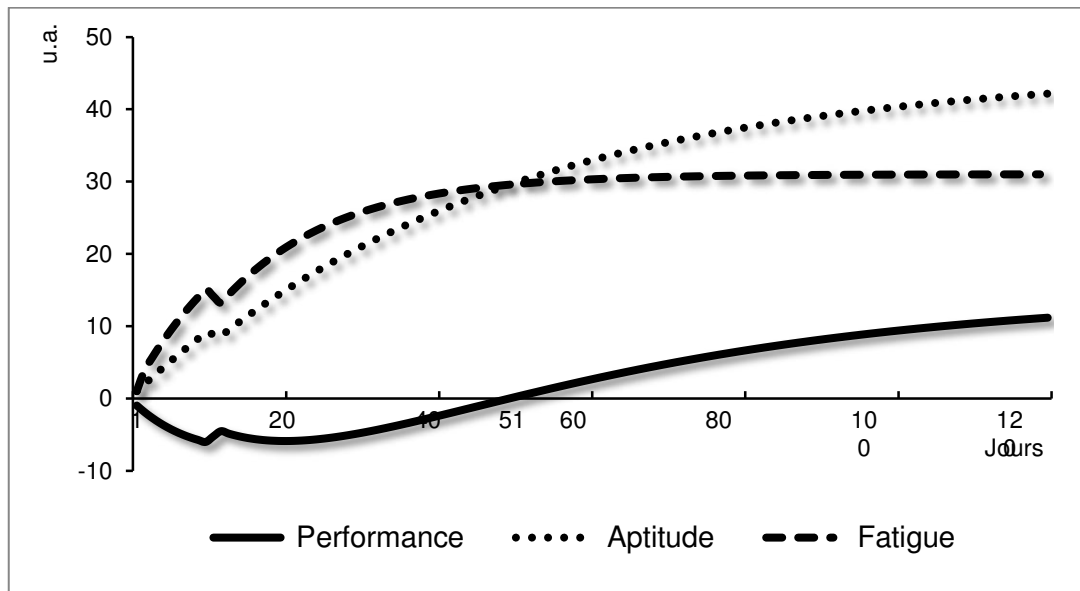


Figure 5 : Variation de la performance selon le modèle de Morton et coll. (1990) ($k_1=1$ et $k_2=2$) pour des CE de 1 u.a. avec deux jours de repos à la 11^{ème} et 12^{ème} journée.

Bien que cela provoque une augmentation du niveau de performance, nous pouvons néanmoins nous interroger sur le fait que la période i (durée entre deux entraînements) concerne aussi bien la fatigue que l'aptitude. Par exemple, l'ajout d'une journée de repos provoque dans leur modèle une baisse du niveau de fatigue, mais aussi plus paradoxalement du niveau d'aptitude (figure 5), alors qu'il est généralement attendu que le niveau d'aptitude augmente avec l'ajout d'une journée de récupération.

1.3.1.4- Durée optimale de récupération

Fitz-Clarke et coll. (1991) ont cherché à optimiser la performance à tout moment du futur en se basant sur l'historique des entraînements réalisés. Partant de la formule définie par Morton et coll. (1990), Fitz-Clarke et coll. (1991) ont utilisé la technique de la courbe d'influence (« influence curve ») pour modéliser les effets de chaque session d'entraînement sur la performance.

La courbe d'influence est la ligne représentant l'effet d'un entraînement à un instant donné t sur la performance à un instant futur t_p . Ce modèle présente deux facteurs de pondération, k_1 et k_2 , qui représentent, respectivement, l'influence des niveaux d'aptitude et de fatigue²³ et τ_1 et τ_2 (en jours), constantes de temps déterminant respectivement la période de diminution de l'aptitude et de la fatigue²⁴ entre les jours d'entraînements.

$$p(t_p) = k_1 \cdot g(t_p) - k_2 \cdot h(t_p) \quad (\text{Équation 8})$$

Où $p(t_p)$ représente la performance à instant t_p . Ainsi $p(t_p)$ peut s'exprimer suivant l'équation suivante :

$$p(t_p) = \int_0^{t_p} \left[k_1 e^{-\frac{t_p-t}{\tau_1}} - k_2 e^{-\frac{t_p-t}{\tau_2}} \right] \quad (\text{Équation 9})$$

Par simplification, nous obtenons :

²³ Valeurs par défaut de k_1 et k_2 : 1 et 2 respectivement

²⁴ Valeurs par défaut de τ_1 et τ_2 : 45 jours et 15 jours respectivement

$$p(t_p) = \int_0^{t_p} L(\mu) w(t) dt \quad (\text{Équation 10})$$

La formulation mathématique de la courbe d'influence est alors :

$$L(\mu) = k_1 e^{\frac{-\mu}{\tau_1}} - k_2 e^{\frac{-\mu}{\tau_2}} \quad (\text{Équation 11})$$

Où $L(\mu)$ est la courbe d'influence, μ est la durée (en jours) entre une période d'entraînement et la performance à un instant t . Pour une compétition à instant t_p , la performance $p(t_p)$ est calculée en multipliant la somme des entraînements, $w(t)$, calculé en TRIMPS²⁵, par la courbe d'influence que décrit la fonction $L(\mu)$. Cette fonction est indépendante de l'entraînement et uniquement en relation avec les quatre variables calculées séparément.

En réutilisant les coefficients de Morton et coll. (1990), Fitz-Clarke et coll. (1991) ont déterminé la durée de la période (t_n), en jours, pendant laquelle le sportif doit réduire son entraînement avant une compétition pour optimiser son niveau de performance.

$$t_n = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \ln \frac{k_2}{k_1} \quad (\text{Équation 12})$$

Fitz-Clarke et coll. (1991) ont également trouvé que la durée optimale du repos après le dernier entraînement était $15,8 \pm 6,5$ jours avant la date de la compétition. Ce point critique correspond au jour où l'augmentation de la fatigue commence à dépasser celui de l'aptitude, c'est-à-dire quand $k_1 g(t_n) = k_2 h(t_n)$ avec les paramètres par défaut précédents. Ils notent que cela correspond aux résultats trouvés précédemment pour des nageurs de haut niveau (Neufer et coll., 1987). La période optimale d'entraînement (t_g), en jours, avant une compétition pour atteindre une performance maximale est donc :

$$t_g = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \ln \frac{k_2 \tau_1}{k_1 \tau_2} \quad (\text{Équation 13})$$

τ_1 et τ_2 étant respectivement égal à 45 et 15 jours, k_1 et k_2 à 1 et 2, la dernière période optimale d'entraînement avant l'élaboration de la performance est donc de 40 jours (équation 13).

²⁵ TRIMP : « training impulse ». Méthode développée par Banister et coll. (1975) pour quantifier la charge d'entraînement. A l'origine cela consiste à multiplier le temps d'entraînement en minutes par la fréquence cardiaque moyenne.

Toute séance d'entraînement incluse dans la période t_n se fera au détriment de la performance à t_p . Fitz-Clarke et coll. (1991) notent cependant que les paramètres par défaut ne peuvent pas être utilisés pour faire un plan d'entraînement pour un large spectre de sportifs, ou dans différents sports, ou pour un même sportif à différentes périodes d'entraînement.

En faisant varier tous les paramètres de 10 %, ils notent que la constante de l'aptitude τ_1 semble avoir une faible influence sur t_n et t_p contrairement à la constante de la fatigue τ_2 , les facteurs de pondération de l'aptitude k_1 , et de la fatigue k_2 , ce qui s'inscrit dans les constats des modèles de Banister et coll. (1975) et de Morton et coll. (1990).

La courbe d'influence est un instrument qui permet de mesurer l'impact positif ou négatif d'une séance d'entraînement avant une compétition en fonction du temps qui les sépare. C'est ici son intérêt majeur.

Bien que les durées des périodes de diminution de la CE (7-35 jours) soient proches de celles trouvées dans la littérature (Bosquet et coll., 2007), cela reste cependant une approche théorique. Comme le notent Fitz-Clarke et coll. (1991), dans la pratique aucun sportif ne restera au repos complet plus d'une quinzaine de jours avant la compétition. Ils précisent cependant que la nature du repos des sportifs est souvent relative, et que des diminutions très importantes de la CE quotidienne et des fréquences quotidiennes et hebdomadaires des séances d'entraînement peuvent être considérées comme équivalentes au repos total de sportifs entraînés.

Comme pour le précédent modèle, il peut être noté que les parts relatives des différentes composantes de la performance (c.-à-d. cardiovasculaire, neuromusculaire) ne sont pas différenciées. Ces évaluations sont pourtant valides, sensibles et reproductibles et conduiraient sans doute à définir des valeurs de constantes spécifiques. Mais elles sont fortement contraignantes.

1.3.1.5- Paramétrage du modèle

1.3.1.5.1- Nombre de paramètres

Testant plusieurs modélisations avec huit sujets non entraînés, Busso et coll. (1991) notent, dans un premier temps, que chez des sujets non entraînés un modèle à une fonction (effets positifs sur la performance) permet de mettre en relation de manière significative les variations de performance et les CE successives pour une constante de temps de 30 à 50 jours. La performance \hat{p} à un jour n est calculée comme suit :

$$\hat{p} = p + \sum_{r=1}^R k_r \sum_{i=1}^{n-1} w_i e^{-\frac{(n-1)}{\tau_r}} \quad (\text{Équation 14})$$

Où p est le niveau de base du sportif, R est le nombre de paramètres du modèle. K_r est le facteur de pondération. w_i est la CE au jour i. τ_r est la constante de temps du paramètre r (c.-à-d., aptitude et fatigue) exprimé en jours. Ce qui pour un modèle à deux paramètres donne :

$$p_n = p + k_1 \sum_{i=1}^{n-1} w_i e^{-\frac{(n-1)}{\tau_1}} - k_2 \sum_{i=1}^{n-1} w_i e^{-\frac{(n-1)}{\tau_2}} \quad (\text{Équation 15})$$

Où w_i est la charge d'entraînement au jour i, τ_1 et τ_2 sont les constantes de temps associées à l'aptitude et la fatigue, k_1 et k_2 sont des coefficients pondérateurs associés à l'aptitude et la fatigue.

Avec deux fonctions (aptitude et fatigue), ils trouvent le même ajustement qu'avec une seule (aptitude), mais l'intensité d'entraînement proposée ne semble pas suffisante pour provoquer une fatigue importante. Les constantes de temps pour la fatigue de leurs sujets sont de 9 et 10 jours, c'est-à-dire sensiblement plus courtes que celles de Calvert et coll. (1976).

Toutefois, la fonction de fatigue améliore la précision du modèle pour deux des huit sujets, pour lesquels ils notent une corrélation significativement positive entre le taux de testostérone et la fonction d'aptitude. Le taux de testostérone est aussi bien corrélé avec la fonction positive (aptitude) qu'avec la fonction négative (fatigue). La pratique régulière d'une activité physique provoque souvent une montée de ce taux, mais chez le sportif

soumis à de fortes CE, c'est l'inverse qui se produit. Les sujets sédentaires de cette étude peuvent en partie expliquer ces corrélations.

Cette étude introduit un élément majeur commun à toutes les modélisations des effets de l'entraînement. La fatigue et l'aptitude semblent être l'expression d'un déséquilibre de l'organisme lié à l'entraînement. Envisager la performance comme la différence entre des effets négatifs et des effets positifs d'un même stimulus peut donc soulever quelques interrogations, même si pédagogiquement cela peut en faciliter la compréhension.

Le calcul des fonctions d'aptitude et de fatigue relève du même mode de calcul mathématique. Seuls diffèrent les coefficients pondérateurs et les constantes de temps, de sorte que si le coefficient pondérateur k_1 , affecté à l'aptitude est inférieur à k_2 , pondérant le terme fatigue, la performance diminue. Si l'aptitude diminue plus lentement que la fatigue ($\tau_1 > \tau_2$), la performance augmentera jusqu'à un maximum et retournera à son niveau initial.

Il serait alors possible de considérer l'état de fatigue comme un niveau de performance inférieur au niveau de base (qu'il conviendrait de définir) et l'aptitude un niveau de performance supérieur au niveau de base.

De même, utiliser un produit de convolution avec un filtre exponentiel expose au principal défaut des filtres passe-bas de premier ordre : le déphasage des données qui dépend de la rapidité des variations des données en fonction du temps. Augmenter notamment le nombre de filtres (c.-à-d., τ_1 , τ_2) permet mathématiquement d'augmenter la précision du modèle pour décrire les données, mais n'améliore pas systématiquement sa capacité de prédiction en dehors de l'intervalle de prédiction. Plus on s'éloigne du point moyen, plus la variance de l'erreur par rapport au modèle est conséquente (Busso T., 2003).

1.3.1.5.2- Récursivité des paramètres

Quelques années plus tard, Busso et coll. (1994) comparent deux formulations des paramètres d'aptitude et de fatigue. Une considérant la performance comme la somme de deux fonctions, positive (c.-à-d., l'aptitude) et négative (c.-à-d., la fatigue) (Banister et

coll., 1975 ; Banister & Hamilton, 1985 ; Busso et coll., 1990 ; Morton et coll., 1990) avec une autre la considérant comme les effets combinés des influences positives et négatives (Busso et coll., 1991). Il s'agit d'envisager alors les fonctions positive (FP) et négative (FN) comme l'accumulation des entraînements, et les influences positive (IP) et négative (IN) comme l'impact de ces entraînements (figures 6a, b, c).

Dans le modèle original, la fonction positive qui représente l'aptitude (en unités arbitraires) est estimée par :

$$FP_n = p^* + k_1 \sum_{i=1}^{n-1} w_i e^{-\frac{(n-1)}{\tau_1}} \quad (\text{Équation 16})$$

Où p^* est la performance, τ_1 est la constante de temps associé à l'aptitude, k_1 est le coefficient pondérateur associé à l'aptitude et w_i est la CE au jour i .

La fonction négative qui représente la fatigue (en unités arbitraires) est estimée par l'équation :

$$FN_n = k_2 \sum_{i=1}^{n-1} w_i e^{-\frac{(n-1)}{\tau_2}} \quad (\text{Équation 17})$$

Où τ_2 est la constante de temps associé à la fatigue, k_2 est le coefficient pondérateur associé à la fatigue et w_i est la CE au jour i .

Dans leur étude, l'influence de l'entraînement au jour i sur la performance au jour n , $I_{(i/n)}$, est estimée par :

$$I_{(i/n)} = k_1 w_i e^{-\frac{(n-1)}{\tau_1}} - k_2 w_i e^{-\frac{(n-1)}{\tau_2}} \quad (\text{Équation 18})$$

Où w_i est la charge d'entraînement au jour i , τ_1 et τ_2 sont les constantes de temps associées à l'aptitude et la fatigue, k_1 et k_2 sont des coefficients de pondération associés à l'aptitude et la fatigue.

Les influences positive et négative (en unités arbitraires) sont dissociées afin de déterminer des profils d'aptitude et de fatigue (figures 6a, b et c, page 45). La baisse de la performance à la fin de l'entraînement est attribuée à la fatigue et son amélioration les jours suivants à l'aptitude.

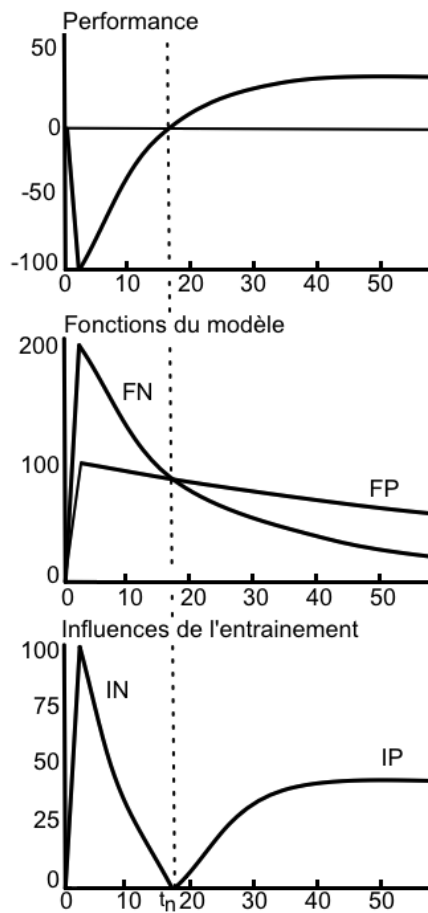
L'influence négative de l'entraînement sur la performance est alors la somme des influences négatives pour l'ensemble de la période au jour n :

$$IN_n = \sum_{i=1}^{n-1} |I(i/n)| \quad \text{quand } I(i/n) < 0 \quad (\text{Équation 19})$$

L'influence positive au jour n est estimée par :

$$IP_n = \hat{p}_n + IN_n \quad (\text{Équation 20})$$

Où \hat{p}_n est la performance estimée au jour n.



Figures 6a, b, c : Variation du niveau de performance pour un entraînement initial de 100 u.a. ($k_1=1$, $k_2=2$, $\tau_1=45$ et $\tau_2=15$) (6a) ; patterns correspondant aux deux fonctions du modèle, FN et PF (6b) ; patterns des influences de l'entraînement sur la performance, IP et IN (6c). t_n est la durée correspondant à l'égalité des deux fonctions FP et FN. D'après Busso et coll., 1994)

Dans cette étude, l'équation mettant en relation les performances du lanceur de marteau avec les entraînements était :

$$p(t) = 496 + w(t) \times \left[0.096e^{\frac{-t}{60}} - 0.27e^{\frac{-t}{13}} \right] \quad (\text{Équation 21})$$

Où 496 points représentent 68,42 mètres, la constante de temps pour l'aptitude était de 60 jours et la constante de temps pour la fatigue de 13 jours. L'ajustement du modèle était statistiquement significatif ($R^2=0,91$, $N=19$, $P<0,001$) et leur permettait d'observer les variations de performance. Ajouter d'autres paramètres à cette équation n'améliore pas la précision, comme cela a pu être constaté dans d'autres études avec des sportifs modérément entraînés (Busso et coll., 1991) et des sportifs de niveau élite (Busso et coll., 1994).

Busso et coll. (1994) notent que l'erreur entre la performance actuelle et la performance prédite peut atteindre 4 % soit 2,73 mètres pour un jet de 68,42 mètres. C'est insuffisant en termes de prédiction de performance pour une compétition à une date définie, mais la fonction permet de tracer une tendance sur plusieurs mois qui peut être riche d'enseignements sur les effets des entraînements.

1.3.1.5.3- Itération des paramètres

S'appuyant sur leur recherche de 1991, Busso et coll. (1997) ont testé une nouvelle formulation du modèle. Chaque paramètre est alors recalculé lors de l'enregistrement d'une nouvelle donnée en utilisant un algorithme récursif des moindres carrés. L'influence des enregistrements passés diminue de façon exponentielle afin d'accorder plus d'importance aux enregistrements récents.

Cette étude postule qu'une séance est influencée dans des proportions variables par les séances précédentes et considère les adaptations aux entraînements comme l'accumulation dans le temps des effets de tous les entraînements précédents, ce qui illustre la notion d'effets différés cumulés pondérés (Werchoschanski J.W., 1985²⁶). Le recalcul continu permet au modèle de mieux décrire la complexité des effets cumulés de

²⁶ Page 119

l'entraînement en postulant que l'influence dans le temps d'un entraînement donné dépend des entraînements précédents.

Un modèle se recalculant à chaque nouvelle séance s'avère une idée intéressante pour étudier les mécanismes sous-jacents aux adaptations du corps. Busso et coll. (1997) trouvent des valeurs moyennes de τ_1 (aptitude) et τ_2 (fatigue) de 56 jours et 5 jours pour le sujet A et de 52 jours et 8 jours pour le sujet B, respectivement. Entre le modèle fixe et le modèle récursif, le coefficient de détermination progresse de 0,682 à 0,875 (28 %) pour le sujet A et de 0,666 à 0,879 (31 %) pour le sujet B.

Même si les variations ne peuvent être clairement corrélées avec des marqueurs biologiques, ce mode de calcul permet de mieux comprendre la chronologie des adaptations à l'entraînement et permet de percevoir les variations comme les précurseurs de la notion de zone optimale de CE. Ce modèle permet de montrer que les réponses à une même CE peuvent varier avec la répétition de ces CE et qu'elles ne sont pas la simple addition dans le temps des réponses à chaque CE comme dans le modèle initial de Banister et coll. (1975).

1.3.1.6- Effet de la fréquence des entraînements

Dans la perspective des recherches de Morton et coll. (1990), Busso et coll. (2002) mettent en évidence que la durée de la période de récupération pour retrouver un bon niveau de performance n'est pas seulement dépendante de la CE, mais aussi de la fréquence des entraînements.

La durée nécessaire pour retrouver le niveau de performance augmentait de $0,9 \pm 2,1$ jours à la fin de l'entraînement à basse fréquence (trois entraînements hebdomadaires, c.-à-d., lundi, mercredi, vendredi) et de $3,6 \pm 2,0$ jours à la fin de l'entraînement à haute fréquence (cinq entraînements hebdomadaires).

La fréquence de l'entraînement semble influencer le niveau de performance en fonction du niveau d'expertise du sujet. Chez le sédentaire par exemple, il est nécessaire d'obtenir un minimum de stimuli par semaine pour envisager des améliorations alors que pour le sportif entraîné, Mujika et coll. (1995) ne notent aucune relation significative entre

la fréquence d'entraînement et le niveau de performance.

Plusieurs auteurs mentionnent l'importance d'une répartition cohérente des CE et des cycles de travail (Matveiev L.P., 1980 et 1983 ; Bompa T.O., 1985 ; Werchoschanski J.W., 1985 ; Kelly & Coutts, 2007). Cette répartition est notamment nécessaire pour tenir compte de l'inertie des différentes adaptations de l'organisme. Werchoschanski J.W. (1985)²⁷ Bompa T.O. (1985)²⁸ et Weineck J. (1983)²⁹ ont en effet mis évidence des variations spécifiques aux compétences développées (endurance, force, souplesse).

Foster et coll. (2001b) notent qu'une forte monotonie³⁰ a des effets négatifs sur la performance. À CE égale, la répartition « quatre jours difficiles, un jour de repos et deux jours de récupération » est mieux tolérée que l'enchaînement de six jours d'entraînement consécutifs suivi d'un jour de repos.

Une grande partie des principes de la planification de la CE est basée sur la prise en compte des effets des interactions entre les différentes CE. Pour Werchoschanski J.W. (1985), l'efficacité des CE dépend de leur succession adéquate, de telle sorte que les effets retardés de la CE précédente provoquent les conditions favorables à la réalisation de la CE suivante. La stratégie de répartition des différents types de CE et des jours de repos dans un microcycle, un mésocycle ou un macrocycle est un paramètre important dont il faut suivre les effets sur la performance. Les réussites de Paavo Nurmi³¹ et Emil Zatopek³² en sont, au travers de leurs méthodes d'entraînement intermittentes, une parfaite illustration.

L'intérêt est double : 1) les périodes de travail doivent permettre d'augmenter la quantité de CE à haute intensité et ainsi favoriser les adaptations positives, et 2) les périodes de récupération (entre les périodes de travail) doivent permettre de diminuer la

²⁷ Page 136

²⁸ Page 193

²⁹ Page 307

³⁰ Selon Foster C. (1998), la monotonie est égale à la moyenne hebdomadaire des CE quotidiennes divisée par l'écart-type des CE quotidiennes.

³¹ Paavo Nurmi (1897-1973) établit vingt-deux records du monde, du 1500 m au 20 km, et remporte douze médailles lors des Jeux Olympiques. Il est considéré comme l'un des précurseurs de nouvelles méthodes d'entraînement rigoureuses et surtout intensives.

³² Emil Zatopek (1946-2000) établit dix huit records du monde et remporte quatre titres olympiques. Sa méthode reposait sur l'entraînement par intervalles; il pouvait s'imposer jusqu'à 100 fois 400 mètres en 1'10"-1'20" dans la même journée.

fatigue. La difficulté réside dans l'ajustement des durées respectives des périodes d'entraînement et des périodes de récupération. Cet ajustement doit permettre d'augmenter le plus possible la CE sans provoquer un syndrome de surmenage³³.

1.3.1.7- Influence relative des variables

Dans la continuité de ses précédentes études, Busso T. (2003) modifie le modèle en introduisant l'augmentation de k_2 avec les CE. Cette modification repose sur l'hypothèse que l'augmentation de la fatigue avec l'accumulation des CE proviendrait en partie d'une modification de la capacité de récupération.

En reprenant les données de son étude de 2002, il montre que cela décrit plus précisément les réponses à l'entraînement (écart-type de $6,47 \pm 0,71$ watts vs $9,20 \pm 2,71$ à $10,31 \pm 1,56$ watts pour les modèles de Banister et coll. (1975) et Calvert et coll. (1976) à un, deux et trois paramètres). Ainsi l'augmentation de la CE provoquerait un déphasage temporel des effets positifs, la réduction de la CE permettant ensuite d'améliorer la performance par une combinaison des effets différés des différents entraînements. Les effets des faibles CE étant plus rapides que les effets des CE importantes.

Dans le cadre de CE identiques répétées chaque jour, Busso T. (2003) établit une relation de type U inversé entre la quantité de CE quotidienne et l'amélioration de la performance, montrant que le gain serait maximal pour une CE optimale au-delà de laquelle le gain serait réduit à cause d'un temps de récupération insuffisant qui conduirait à une accumulation de fatigue.

Cette relation en U inversé montre l'importance du principe d'entraînement charge/décharge empiriquement constaté par les entraîneurs, qui peut s'exprimer en termes de période d'affûtage (Thomas et coll., 2008 et 2009).

³³ Surmenage (« overreaching ») : correspond à une fatigue aiguë réversible (en quelques jours ou semaine), liée à une augmentation de la charge d'entraînement et se traduisant par une baisse à court terme du niveau de performance (Meeusen et coll., 2013).

Bien que le niveau d'expertise des sujets et que la période d'entraînement ne soient pas importants, Busso T. (2003) confirme qu'accomplir des performances de haut niveau est un long processus dont les caractéristiques varient avec le temps. Il montre que la fatigue calculée quotidiennement, et par conséquent la récupération, est un paramètre qui fait varier de manière plus importante la performance que le paramètre d'aptitude. Cela montre l'importance de l'évaluation régulière des capacités du sportif dans le calcul des effets de l'entraînement sur la performance.

À RETENIR

Les relations entre entraînements et performances semblent être plus complexes qu'une simple relation dose-effet.

Dans les années quatre-vingt-dix, le modèle originel de Banister et coll. (1975) a fait l'objet de beaucoup d'études, et de propositions de variantes destinées notamment à mieux comprendre l'affûtage et le surentraînement.

Ces études portent sur les constantes de temps, les constantes de pondération, leur nombre, leur mise en équation, l'impact de la fréquence des entraînements, et leurs influences dans le temps.

Bien que le modèle ne soit pas remis en cause dans sa forme générale, ces études conduisent à trois interrogations majeures :

1. Est-il pertinent de différencier l'aptitude et la fatigue pour déterminer le niveau de performance ?

2. Comment individualiser durant la saison le ratio entraînement/récupération (charge/décharge) ?

3. Le nombre de paramètres et leurs méthodes de calcul peuvent-ils mesurer plus précisément les influences différées et cumulées des entraînements ?

1.3.2- Potentiel personnel et limites acceptables

Au début des années 2000, Perl J. (2000, 2001a, 2001b) développe le modèle potentiel de performance *Perpot*³⁴ pour décrire et analyser le phénomène des adaptations physiologiques, notamment le mécanisme de surcompensation.

Il intègre deux notions fondamentales jusque-là absentes des autres modèles, celle de potentiel, définie comme un niveau de ressources (qui ne sont pas définies explicitement) dont le sportif dispose pour réaliser une performance, et celle de limite de surcharge.

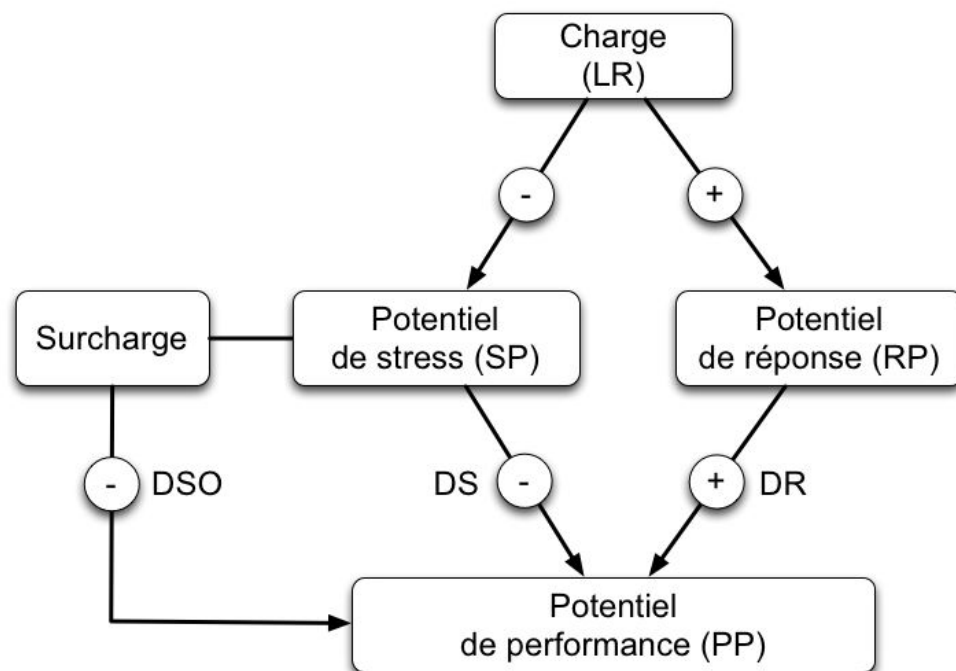


Figure 7 : Structure antagoniste avec surcharge du modèle *PerPot*, Perl J. (2000). Potentiel de stress : traduction libre de Strain potential. Potentiel de réponse : traduction libre de Response potential.

Le modèle (figure 7) est contrôlé dynamiquement par deux variables qui influencent positivement (RP) et négativement (SP) la performance. Ces deux variables dépendent de manière égale de l'entraînement et influencent la performance de façon antagoniste, en fonction des délais des influences négatives (DS) et positives (DR). Si le

³⁴ Perpot : Performance Potential, traduction libre

potentiel de stress atteint sa limite supérieure, un flux de surcharge (DSO) se produit, qui réduit le potentiel de performance, ce qui peut, dans des cas extrêmes, conduire au surentraînement. Les variables initiales du modèle sont déterminées individuellement par un ajustement basé sur la méthode des moindres carrés entre des performances prédites et des performances réelles.

Si les constantes de temps de DS et DR sont identiques, il n'y a aucun effet sur le potentiel de performance. Par contre si les constantes de temps sont différentes le potentiel de performance évolue à la hausse (lorsque $DS > DR$) ou à la baisse (lorsque $DS < DR$) (figure 8). Ces variations de délais dépendent également du niveau des potentiels de stress (SP) et de réponse (RP) au cours du temps.

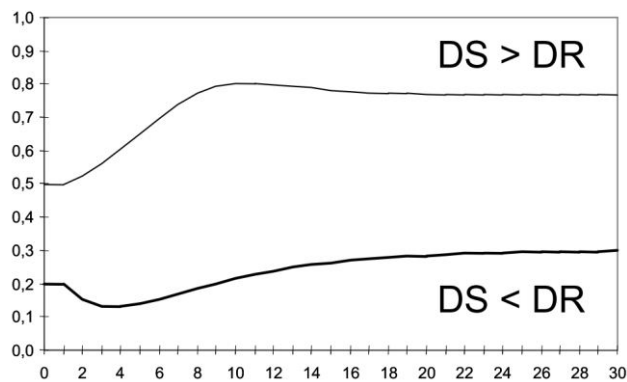


Figure 8 : PerPot : Effets des potentiels DS et DR sur la performance (Perl J., 2000)

Les équations, qui ont toutes leur limite supérieure normalisée à 1 et leur limite inférieure à 0, sont :

$$SP := SP + LR \quad (\text{Équation 22})$$

Où SP est le potentiel de stress et LR est la charge (traduction libre de « Load Rate »)

$$RP := RP + LR \quad (\text{Équation 23})$$

Où RP est le potentiel de réponse

$$SP := \frac{\min(\min(1, SP), \max(0, PP))}{DS} \quad (\text{Équation 24})$$

Où PP est le potentiel de performance.

$$RR := \frac{\min(\min(1,RP),\max(1,1-PP))}{DR} \quad (\text{Équation 25})$$

$$OR := \frac{\max(0,SP-1)}{DSO} \quad (\text{Équation 26})$$

Où OR est le flux de surcharge (traduction libre de « Overflow Rate »)

Mise à jour de SP, RP et OR :

$$SP := SP - SR - OR$$

$$RP := RP - RR$$

$$PP := PP + RR - SR - OR \quad (\text{Équation 27})$$

Avec six étudiants gymnastes non sédentaires et actifs, Pfeiffer M. (2008) montre que le modèle *Perpot* est aussi précis que le modèle « aptitude-fatigue », avec un écart moyen relatif de 2,78 % (modèle de Banister et coll., 1975) et de 2,48 % (modèle *Perpot*), mais une variabilité plus importante.

L'intérêt majeur du modèle *Perpot* par rapport aux autres modèles est qu'il est borné, c'est-à-dire que les variables ont une capacité limitée. Ce modèle pourrait ainsi permettre de mieux appréhender les notions de surmenage et de surentraînement et offre une méthode alternative, basée sur les modèles dynamiques non linéaires, pour optimiser l'entraînement. Il n'y a par contre que très peu de données disponibles dans la littérature scientifique.

Pfeiffer M. (2008) mentionne qu'en multipliant par trois les valeurs des délais des influences négatives (DS) et positives (DR), elles peuvent alors être exprimées en jours. Les valeurs de DS varient de 10 à 47 jours (moy.=16,9±9,8 jours) et de 8 à 44 jours pour les valeurs de DR (moy.=19,9±9,6 jours).

Bien que mathématiquement différent, le modèle *Perpot* conserve un postulat identique à celui de Banister et coll. (1975). Il considère que la performance est sous la dépendance d'influences positives et négatives.

1.3.3- Autorégulation et rétroaction

Les modèles traditionnels sont basés sur des concepts mathématiques linéaires, car ils sont le plus souvent basés sur les relations entre la vitesse et le temps afin de caractériser les processus énergétiques sous-jacents à la performance (Bocquet & Billat, 1999). Néanmoins, puisque les caractéristiques bioénergétiques d'un sportif diffèrent avec le temps et que les adaptations biologiques de l'organisme le conduisent à lui-même changer, ce problème complexe peut être abordé de manière non linéaire (Avalos et coll., 2003) (figure 9).

Hohmann et coll. (2000) démontrent ainsi que les effets de l'entraînement sur la performance en compétition peuvent être modélisés par le modèle mathématique non linéaire des réseaux de neurones à rétropropagation.

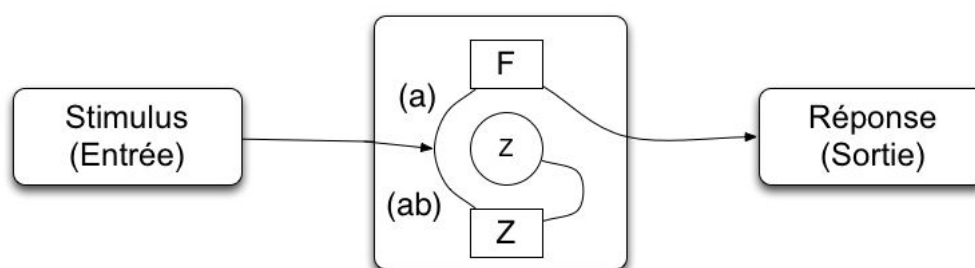


Figure 9 : Concepts linéaire (a) et non linéaire (b) de l'adaptation à l'entraînement, Hohmann et coll. (2000)

Le principe est de considérer que les effets de l'entraînement sont aussi dans une certaine mesure le résultat d'influences endogènes (données anthropométriques, genre, horloge biologique). Si le niveau des performances d'un sportif change, sa capacité d'adaptation à l'entraînement se modifie également.

Un des avantages majeurs est qu'il n'y a pas besoin de transformer les données originales d'entraînement en unités arbitraires et qu'il permet de modéliser les transformations linéaires et non linéaires liées à l'entraînement.

L'intérêt le plus important du modèle non linéaire des adaptations à l'entraînement de Hohmann et coll. (2000) est qu'il caractérise la réaction de l'organisme qui tend à rechercher un certain niveau de stabilité malgré l'influence de l'entraînement. En ce sens,

le réseau de neurones peut ainsi aider à identifier les zones optimales de charge pour atteindre un niveau optimal de performance, car les effets positifs de l'entraînement sur la performance ne sont pas illimités (Fry et coll., 1991 ; Morton R.H., 1997).

La précision du réseau de neurones est bien plus sensible que celle réalisée par les régressions multiples habituelles (plus de trois fois supérieures dans le cas de la nageuse testée) (Edelmann-Nusser et coll., 2002 ; Silva et coll., 2007).

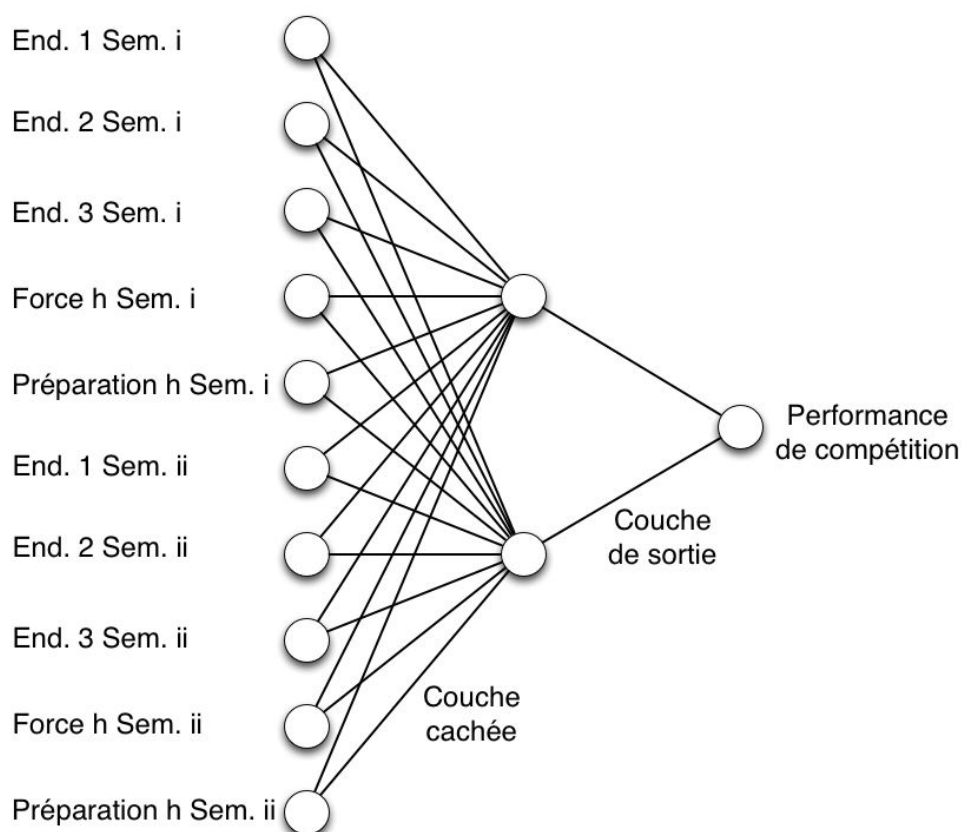


Figure 10 : Perceptron multicouche avec 10 neurones (cercles : neurones, lignes : connexions entre les neurones) - Hohmann et coll., 2000

Une étude de Edelmann-Nusser et coll. (2002) confirme la très grande précision de la prédiction de performance réalisée avec un réseau de neurones artificiels. L'erreur de prédiction est de 0,05 seconde sur un temps total de 2'12''64 pour une nageuse de 200 mètres brasse de niveau olympique en se basant sur les quatre semaines d'entraînement précédant la compétition.

Silva et coll. (2007), à l'aide d'un même modèle mathématique, notent une erreur de prédiction inférieure à 0,8 % entre les performances estimées et les performances réelles avec cent trente-huit jeunes nageurs (65 hommes et 73 femmes) de 200 mètres quatre nages et 400 mètres dos crawlé. Ils considèrent que le réseau de neurones est un bon outil pour résoudre non seulement les problématiques liées à l'impact de l'entraînement sur la performance, mais aussi la détection des talents dans un large panel de sports.

Avec dix neurones sur la couche d'entrée, deux neurones sur la couche cachée et un neurone sur la couche de sortie (figure 10), l'apprentissage du modèle utilisé par Edelman-Nusser et coll. (2002) nécessite quarante ensembles de données. Ce qui les a conduits à appliquer le modèle avec les données d'un autre sportif et à noter que la précision de prédiction peut être fortuite.

Deux inconvénients majeurs peuvent se poser. Le premier tient à ce que ce modèle est non paramétrique et fonctionne comme une boîte noire, ce qui ne permet d'établir de causalité entre le descripteur et la ou les variables à prédire (Hellard et coll., 2006). Le second vient de la difficulté à le paramétrer (à cause du nombre de neurones).

À RETENIR

Les progrès de l'informatique ouvrent de nouvelles voies d'exploration du modèle originel de Banister et coll. (1975).

La puissance de calcul des ordinateurs autorise le traitement d'un grand volume de données pour tenter de simuler les oscillations antagonistes qui peuvent exister dans les systèmes autorégulés (Perl J. 2000) au travers de modèles de calcul inspirés du fonctionnement des neurones biologiques (c.-à-d., modèle du réseau de neurones artificiel de Hohmann et coll., 2000).

Ces études introduisent de nouvelles recherches sur le type et le nombre des valeurs d'entrée (c.-à-d. des marqueurs de l'entraînement), sur les limites (seuils) conduisant à l'épuisement des capacités de l'organisme, mais aussi les algorithmes de calcul de l'évolution de leurs valeurs dans le temps.

1.4- MARQUEURS MECANIKES, BIOLOGIQUES ET/OU SUBJECTIFS

Les relations entre entraînement et performance incitent les sportifs à augmenter régulièrement la CE, souvent de manière empirique. L'entraînement a pour objet de développer les adaptations nécessaires à l'organisme pour pouvoir produire un effort approprié à une spécialité sportive spécifique. Les adaptations se déclenchent dès que l'organisme ne réussit plus à répondre aux exigences des entraînements avec son potentiel actuel (Manno R., 1989). Les progrès sont donc plus faibles chez les pratiquants de haut niveau, et chez les sportifs dont les performances sont proches de leurs limites, car l'adaptation comporte des marges délimitées par le tissu génétique et se développe avec une efficacité qui dépend essentiellement de l'âge, du sexe et des stimuli ambiants (Manno R., 1989³⁵)

Ce comportement est également amplifié par le manque de bons résultats en compétition qui incite l'entraîneur et les sportifs à augmenter encore plus CE. Un état de surmenage ou de surentraînement (Meeusen et coll., 2013) peut apparaître, caractérisé par une grande variété de symptômes fréquemment observés dans les cas de volume et d'intensité d'entraînement maintenus trop longtemps à de hauts niveaux.

Pour modéliser l'entraînement et ses effets sur la performance, il est donc indispensable de quantifier l'entraînement et la performance. Le choix du ou des marqueurs de l'entraînement et du ou des marqueurs de la performance est alors déterminant. Ces marqueurs auront une influence importante dans la qualité de l'ajustement de la modélisation. Ils doivent également être testés sur une population spécifique pour déceler plus facilement le plus petit changement significatif (Hopkins W.G., 2010).

Se pose alors le problème de la normalisation de la CE en unité arbitraire des activités physiques aux caractéristiques énergétiques, neuromusculaires et psychoaffectives différentes.

³⁵ Pages 194-213

Il existe différentes méthodes qui s'inspirent généralement de la définition proposée par Werchoschanski J.W. (1985)³⁶. Elles peuvent être classées en deux catégories principales : les méthodes basées sur les données mécaniques et physiologiques et les méthodes basées sur les données subjectives.

Les premières représentent des mesures essentiellement quantitatives. Leur principal intérêt réside dans l'importante fiabilité, sensibilité et reproductibilité des procédures d'évaluation. La réponse des indicateurs physiologiques peut être par contre quelque peu déphasée par rapport aux entraînements et ces mesures peuvent également être coûteuses à obtenir sur le terrain.

Les secondes représentent des mesures qualitatives qui consistent à demander au sportif d'évaluer lui-même certains paramètres à l'issue des entraînements. Elles ont pour qualité première d'être adaptables aux différents environnements d'entraînement et d'être peu onéreuses. Néanmoins ces perceptions varient sensiblement suivant le sportif et l'instant de la collecte.

1.4.1- Marqueurs physiologiques

1.4.1.1- La fréquence cardiaque et sa variabilité

Pour le calcul des TRaining IMPulses (TRIMPS) dans les sports à forte prédominance aérobie, Banister & Calvert (1980) proposent d'utiliser la fréquence cardiaque moyenne de la séance (FC_{moy}) comme marqueur de l'intensité. Multipliée par la durée (D) en minutes, elle fournit une CE exprimée en unité arbitraire (TRIMP).

$$TRIMP = FC_{moy} * D \quad (\text{Équation 28})$$

Morton et coll. (1990) enrichissent la formule et proposent une reformulation pour corriger le biais lié aux longs entraînements à un faible niveau de fréquence cardiaque. Le correctif prend la forme :

³⁶ Page 96

$$Y = e^{b \frac{(FC_{exe} - FC_{rep})}{(FC_{max} - FC_{rep})}} \quad (\text{Équation 29})$$

Où Y est la valeur du correctif, b prend pour valeur 1,67 pour les femmes et 1,92 pour les hommes. FC_{exe} est la fréquence cardiaque d'effort, FC_{max} est la fréquence cardiaque maximale et FC_{rep} est la fréquence cardiaque de repos. Nous obtenons donc l'équation de calcul de TRIMP :

$$TRIMP = D \frac{(FC_{moy} - FC_{rep})}{(FC_{max} - FC_{rep})} e^{b \frac{(FC_{exe} - FC_{rep})}{(FC_{max} - FC_{rep})}} \quad (\text{Équation 30})$$

Où D est la durée de l'exercice (en minutes), FC_{moy} est la fréquence cardiaque moyenne, FC_{rep} la fréquence cardiaque de repos et FC_{max} la fréquence cardiaque maximale. b prend pour valeur 1,67 pour les femmes et 1,92 pour les hommes.

Pour répondre au manque de discrimination de l'intensité par la fréquence cardiaque moyenne, mais aussi parce que la fréquence cardiaque peut ne jamais se stabiliser même si la vitesse reste constante (Dawson et coll., 2005), Edwards S. (1993) détermine la charge interne en additionnant le produit du temps passé dans chacune des cinq zones de fréquence cardiaque par leur coefficient relatif (Tableau 1) :

$$CE = D1 \times C1 + D2 \times C2 + D3 \times C3 + D4 \times C4 + D5 \times C5 \quad (\text{Équation 31})$$

Où CE est la charge d'entraînement en TRIMP, D est la durée passée dans la zone (en minutes) et C est le coefficient pondérateur de la zone (en unités arbitraires).

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

Tableau 1 : Zones de fréquence cardiaque (Edwards S., 1993)

Le problème principal de la méthode d'Edwards se situe dans le manque de progressivité de la structuration de l'intensité en zones. Passer de 69% à 71% de FC fait évoluer la CE de 120 à 180 TRIMP pour une durée d'une heure (60 minutes).

Wood et coll. (2005) font référence au seuil ventilatoire. Ces auteurs calculent la CE en multipliant le temps passé dans chaque zone par un coefficient pondérateur (tableau 2).

Zone	Fréquence cardiaque	Coefficient
1	Moitié inférieure entre 50 % de FC de réserve et limite inférieure de la zone 3	2
2	Moitié supérieure entre 50 % de FC de réserve limite inférieure de la zone 3	4
3	FC au seuil ventilatoire±5 bpm	6
4	Entre limite supérieure de la zone 3 et FC maximale - 5 bpm	10
5	Effort supérieur à FC maximale - 5 bpm	16

Tableau 2 : Facteurs de pondération pour chaque zone d'intensité d'entraînement (Wood et coll., 2005). FC : fréquence cardiaque. bpm : battements par minute

La charge d'entraînement suivant l'équation suivante :

$$CE = D_1 \times C_1 + D_2 \times C_2 + D_3 \times C_3 + D_4 \times C_4 + D_5 \times C_5$$

(Équation 32)

Où CE est la charge d'entraînement en TRIMP. D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 sont les durées passées dans chaque zone (en minutes). C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 sont les coefficients attribués à chaque zone (tableau 2). Les zones sont réajustées toutes les quatre semaines en fonction d'un test sur tapis roulant.

Dans cette étude de cas, Wood et coll. (2005) notent que : 1) la composante de fatigue du modèle de Banister et coll. (1975) est modérément corrélée avec l'item fatigue du POMS ($r=0,75, p<0,05$) ; 2) la composante d'aptitude est fortement corrélée à la vitesse de course au seuil ventilatoire ($r=0,94, p<0,0001$) et l'économie de course³⁷ ($r=0,61, p=0,04$).

³⁷ Dans cette étude, l'économie de course était définie comme la consommation d'oxygène du sujet courant à une vitesse de course de 17 km.h⁻¹ (test sur tapis roulant de 18 paliers de 1 minute avec une augmentation de la vitesse de 0,3 km.h⁻¹. La vitesse initiale était de 13,5 km.h⁻¹ et se terminait à 18,6 km.h⁻¹.

Commentaires

Dans une revue de la littérature de cent soixante articles scientifiques, Achten & Jeukendrup (2003) montrent que l'utilisation du cardiofréquencemètre s'est beaucoup généralisée dans le monde sportif amateur et professionnel. Sa fiabilité et sa précision, qui ne cesse de s'améliorer avec le temps, permettent d'avoir en temps réel une information sur les variations de la fréquence cardiaque. Le cardiofréquencemètre peut donc se révéler un outil pratique pour évaluer l'intensité de l'effort et ainsi contribuer à la quantification de la CE du fait de l'existence d'une relation quasi linéaire entre la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène à l'effort sous maximal.

Néanmoins, cette relation étant personnelle, la réalisation préalable d'une épreuve d'effort avec mesure de la consommation d'oxygène s'impose notamment à cause de la grande variabilité interindividuelle de la fréquence cardiaque. De plus, la déshydratation peut provoquer une augmentation significative de la fréquence cardiaque. Gonzalez-Alonso et coll. (1997) montrent chez des coureurs entraînés qu'une déshydratation de 4 % induit une augmentation de la fréquence cardiaque de 5 %. Saltin B. (1964) montre que plus la déshydratation est importante (équivalent à 1,5 %, 3 % et 4,2 % de la masse corporelle) plus la fréquence cardiaque augmente (2,5 %, 4,4 % et 7,4 % respectivement). Cela signifie que plus le corps est déshydraté moins la fréquence cardiaque est une variable fiable pour mesurer l'intensité de l'effort.

Pour les sports dont les efforts sont de type intermittent et d'intensité variable, la principale limite tient à l'inertie du système cardio-vasculaire qui induit une sous-estimation de la fréquence cardiaque pour des efforts intenses dont la durée est inférieure à une trentaine de secondes. En outre, au-delà d'une certaine intensité correspondant à l'atteinte de la consommation maximale d'oxygène, la fréquence cardiaque n'augmente plus, quelles que soient les intensités d'effort. Lorsque le niveau de fatigue atteint s'élève, les valeurs de repos de la fréquence cardiaque et de la variabilité de la fréquence cardiaque se normalisent et il est constaté une diminution importante des valeurs d'exercice (Bosquet L., 2008).

Dans le cadre de la quantification de la CE, la fréquence cardiaque semble donc un marqueur plus spécifiquement dédié aux activités physiques locomotrices à fortes

prédominances aérobies, dont les durées d'effort dépassent plusieurs minutes et dont l'intensité est très souvent inférieure à celle correspondant à la consommation maximale d'oxygène. Elle ne semble pas adaptée aux activités physiques locomotrices dont les intensités d'effort peuvent être partiellement supérieures à celle correspondant à la consommation maximale d'oxygène ainsi qu'aux activités non locomotrices (Algrøy et coll., 2011).

1.4.1.2- La lactatémie

La lactatémie évoluant en fonction de l'intensité de l'effort, Mujika et coll. (1995, 1996) calculent la charge d'entraînement au moyen de coefficient pondérateur reflétant le niveau de lactate sanguin en fonction des intensités d'entraînement (mesuré au préalable à différentes vitesses de nage) (tableau 3). Mujika et coll. (1995) précise qu'après discussion avec les entraîneurs, une heure d'entraînement à sec (échauffement, étirement, renforcement musculaire) est considérée comme équivalent à 2 km de nage.

Zone	Lactatémie	Coefficient
1	[La]<2 mM	1
2	2 mM<[La]<4 mM	2
3	4 mM<[La]<6 mM	3
4	6 mM<[La]<10 mM	5
5	[La] > 10 mM	8

Tableau 3 : Facteurs de pondération pour chaque zone d'intensité d'entraînement (Mujika et coll., 1996). [La] : lactatémie

La charge d'entraînement totale se calcule comme :

$$CE = D_1.C_1 + D_2.C_2 + D_3.C_3 + D_4.C_4 + D_5.C_5 \quad (\text{Équation 33})$$

Où D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 sont les distances en km parcourues respectivement dans les zones 1, 2, 3, 4,5 et C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 sont les facteurs de pondérations des 5 zones.

Lucia et coll. (2003) proposent un système simplifié de calcul des TRIMPS basé sur les seuils aérobie et anaérobie³⁸ dont la principale limite tient à la grandeur des zones (tableau 4).

Zone	Description	Coefficient
Zone 1	<Seuil aérobie	1
Zone 2	Entre les seuils	2
Zone 3	> seuil anaérobie	3

Tableau 4 : Zones d'intensité (Lucia et coll., 2003)

Commentaires

La fiabilité du lactate comme marqueur de l'intensité est remise en question, notamment à cause de la difficulté à le prélever directement dans son site de production. Dans une revue de la littérature sur le lactate, Cazorla et coll. (2001) notent que la mesure de la concentration sanguine du lactate à l'issue de l'exercice intense ne reflète ni la production ni l'accumulation de lactate au sein du muscle, et que le lactate présent dans le muscle ou dans le sang représente ce qui reste de sa production, une fois éliminée la partie métabolisée.

Karlsson & Saltin (1971) avaient déjà montré que la concentration de lactate dans le muscle frais était 1,5 à 2 fois supérieure à celle mesurée dans le compartiment sanguin à la suite d'un effort maximal intermittent (25 à 40 mmol.l⁻¹ dans le muscle contre 10 à 20 mmol.l⁻¹ dans le sang). À noter que dans ces deux compartiments, le taux de lactate augmente avec l'intensité de l'effort. De plus, l'élimination rapide du lactate, dont la demi-vie est d'environ dix minutes, rend sa mesure difficile in situ, d'autant plus en routine quotidienne.

Lacour et coll. (1990) ont suivi pendant une saison les meilleurs coureurs de 400 m et de 800 m français et ont pu mesurer le taux de lactate sanguin à la fin de plusieurs courses en compétition. Leurs résultats montrent que plus le coureur produit du lactate, meilleure est sa performance.

³⁸ Seuil aérobie : lactatémie de 2 mmol.l⁻¹. Seuil anaérobie : lactatémie de 4 mmol.l⁻¹ (Billat V., 2003, p. 164)

Dans cette perspective, Miller et coll. (2002a et 2002b) ne notent pas de changement de la difficulté de l'effort mesurée avec une échelle de perception de l'effort (EPE) lors d'un exercice de pédalage avec ou sans perfusion de lactate.

Le lactate ne semble donc pas être un marqueur suffisamment fidèle pour être utilisé dans le calcul de la CE.

1.4.2- Marqueurs mécaniques

1.4.2.1- Puissance mécanique

Une autre approche non invasive repose sur les variations de la puissance mécanique et de ses composantes (force et vitesse) afin de mesurer indirectement les réponses physiologiques.

Coggan A. (2003) crée ainsi le concept de Training Score Stress (TSS), grandeur normalisée, qui permet potentiellement de comparer les charges entraînement, quel que soit le niveau d'expertise (débutant ou expert), en cyclisme.

$$TSS = \frac{D \times NP \times IF}{FTP \times 3600} \times 100$$

(Équation 34)

Où TSS est le Training Score Stress, D la durée en secondes, NP la puissance normalisée en watts, IF le facteur d'intensité relative (=NP/FTP), FTP la puissance maximale que l'on peut maintenir pendant une heure.

Coogan A. (2003) détermine le FTP en multipliant le résultat d'un test de puissance critique en watts sur 20 minutes par 0,95.

La puissance normalisée est calculée comme suit :

$$NP = \sqrt[4]{\sum MMP_{30}^4} \quad (\text{Équation 35})$$

Où MMP_{30} est la moyenne mobile de la puissance moyenne des 30 dernières

secondes d'effort.

IF mesure l'intensité de l'effort. Un IF supérieur à 1 pour une séance de moins d'une heure indique une puissance maximale (FTP) sous-estimée. Un IF inférieur à 0.75 correspond à une séance de récupération.

Selon Coggan A. (2003), un TSS inférieur à 150 points est considéré comme faible et indique que la fatigue liée à la séance pratiquée est dissipée en moins d'une journée. Un TSS supérieur à 450 points est considéré comme très fort et indique que la fatigue liée à la séance pratiquée ne dissipera pas avant plusieurs jours.

Il définit ensuite son « Performance Manager » comme :

$$TSB = CTL - ATL \quad (\text{Équation 36})$$

Où TSB est le Training Stress Balance, qui mesure les effets combinés de l'entraînement dans le temps.

CTL est la charge d'entraînement chronique (traduction libre de « Chronic Training Load »), qui mesure les effets de l'entraînement à moyen terme. Il est possible de le considérer comme l'équivalent des effets positifs du modèle de Banister et coll. (1975). C'est une moyenne mobile exponentielle dont la valeur par défaut est 42.

ATL est la charge d'entraînement aiguë (traduction libre de « Acute Training Load ») qui mesure les effets de l'entraînement à court terme. Il peut être considéré comme l'équivalent des effets négatifs du modèle de Banister et coll. (1975). C'est une moyenne mobile exponentielle dont la valeur par défaut est 7. Coggan A. (2003) note que pour des sujets jeunes la valeur de l'ATL se situe autour de 4 à 5 jours, et pour des sujets âgés la valeur de l'ATL se situe autour de 10 à 12 jours.

Les formules de calcul sont basées sur les moyennes mobiles exponentielles afin d'objectiver les variations des effets positifs et des effets négatifs des stimuli d'entraînement pour améliorer le contrôle de la capacité de performance et diminuer de la probabilité de blessures.

Bien qu'elle ne fasse pas l'objet de publication scientifique, cette méthode reste

innovante en ce sens où elle utilise des outils statistiques du milieu financier couramment utilisés pour tenter de prédire le cours des actions en bourse. Le TSB est par exemple l'inverse de la MACD (Moving Average Convergence Divergence, ou convergence et divergence des moyennes mobiles) qui est un indicateur boursier qui participe à l'analyse technique des actions en ce sens qu'il consiste en l'étude des graphiques des cours dans le but d'identifier les tendances et d'anticiper les variations des marchés.

Le « Performance Manager » semble pertinent pour préparer le cycliste à ses pics de performance par la maîtrise des variations des courbes d'ATL et de CTL afin de permettre une augmentation du TSB. Selon Coggan A. (2003), un TSB inférieur à -10 indique un faible état de fraîcheur contrairement à un TSB supérieur à 10 qui indique un bon état de fraîcheur. Entre -10 et 10, l'état de fraîcheur est considéré comme neutre.

Cette méthode ne peut être utilisée que dans les sports mécaniques où pour chaque entraînement il est possible de mesurer la puissance. De plus, s'agissant de moyennes mobiles exponentielles, un manque de données influera négativement sur la précision. Avec les valeurs par défaut 7 pour l'ACT et 42 pour la CTL, l'oubli de saisie d'une séance réellement pratiquée produit approximativement une variation de $\pm 11\%$ sur le TSB, variation d'autant plus importante que la séance est récente.

Puisque la vitesse est fonction de la puissance et qu'elle est d'un intérêt majeur pour les coureurs à pied, McGregor S. (2008a et b) propose une déclinaison du concept de TSS de Coogan A. (2003) nommée rTSS (running Training Stress Score). NP est remplacée par NGP (Normalized Graded Pace), l'allure ajustée en fonction de la pente (qui peut être donnée par un GPS), qui est censée être le reflet des changements d'intensité qui détermineraient le coût physiologique de la course sur différents terrains (pentes de différentes natures).

1.4.2.2- Vitesse

Hayes & Quinn (2009) proposent un modèle basé sur la vitesse qui s'inspire des modèles développés par Hopkins et coll. (1989) (exponentiel à trois paramètres) et de Morton R.H. (1996) (hyperbolique à trois paramètres). La vitesse maximale est définie

comme :

$$v(t) = (v_{max} - v_{crit})e^{-\mu t} + v_{crit} \quad (\text{Équation 37})$$

Où $v(t)$ est la vitesse maximale qui peut être maintenue sur un temps donné, v_{max} est la vitesse maximale instantanée, v_{crit} est la vitesse critique, μ est une constante qui n'a pas de signification physiologique.

Reformulée, elle est définie comme :

$$v(t) = \frac{ADC(v_{max}-v_{crit})}{(v_{max}-v_{crit})+ADC} + v_{crit} \quad (\text{Équation 38})$$

Où ADC est la capacité anaérobie (traduction libre de « Anaerobic Distance Capacity »). Ils proposent une nouvelle méthode de calcul individuelle dépendant de v_{max} et v_{crit} .

Le score de TRIMP est alors :

$$W = I \times C \times D \quad (\text{Équation 39})$$

Où W est le score de TRIMP, I l'intensité relative de l'entraînement, C la concentration de l'entraînement, c'est-à-dire l'expression de la prise en compte de la nature et de la durée de récupération entre les répétitions, et D la distance en mètres. L'intensité I dépend du modèle à trois paramètres et est strictement individuelle, et dépend des performances réelles du sportif.

$$I(D_{act}) = \frac{v_{act}}{v_{opt}} + \frac{v_{act}-v_{crit}}{v_{max}-v_{crit}} \quad (\text{Équation 40})$$

Où v_{act} est la vitesse moyenne actuelle, v_{opt} est la vitesse optimale. La concentration C prend en considération le temps de récupération entre les répétitions et les séries en le relativisant au temps d'effort. Elle intègre également la nature de la récupération.

$$C(D_{act}) = 1 + \frac{I(nD_{act})-I(D_{act})}{I(D_{act})} e^{\sigma \frac{\tau_{rec}}{\tau_{effort}}} \quad (\text{Équation 41})$$

Où D_{act} est la distance d'une répétition, τ_{rec} est le temps de récupération entre les répétitions, τ_{effort} est le temps d'effort d'une répétition, σ est une valeur qui dépend du type de la récupération : arrêt, marche, course.

$$\sigma = 1 - \frac{v_{rec}}{v_{crit}} \quad (\text{Équation 42})$$

Pour une récupération passive, σ vaut 1 et pour une récupération à v_{crit} , σ vaut 0. La distance D n'intègre pas seulement la distance parcourue, mais aussi la distance au regard de la distance optimale :

$$D = \alpha n D_{act} \quad \text{où } n \text{ est le nombre de répétitions de chaque distance} \quad (\text{Équation 43})$$

$$\alpha = q_D + (q_{nD} - q_D) e^{\sigma \frac{\tau_{rec}}{\tau_{effort}}} \quad (\text{Équation 44})$$

Où :

$$q_D = D_{act} / D_{opt} \quad (\text{Équation 45})$$

La formule finale pour un entraînement d'une série de n répétitions d'une distance D_{act} est :

$$TRIMP = I(D_{act}) \times C(D_{act}) \times D \quad (\text{Équation 46})$$

Les prérequis du modèle sont de baser le calcul des TRIMP sur un profil énergétique personnel inspiré de la décroissance progressive de la puissance avec le temps pour des efforts à intensité maximale. Hayes & Quinn (2009) font ainsi référence à la vitesse maximale sur la distance parcourue à l'entraînement. Ils intègrent également la densité de l'entraînement qui est un paramètre important, car la durée et le type de récupération ont une influence sur la nature des ressources énergétiques sollicitées.

Commentaires

Lorsqu'il s'agit, pour mesurer la vitesse et la puissance, d'utiliser des outils technologiques dont la précision est très liée à l'évolution de la puissance des ordinateurs et à la complexité du matériel informatique, il convient toujours d'être prudent.

Ainsi, la plupart des études disponibles montrent que la précision du GPS est fonction de la vitesse de course, de la distance parcourue, du caractère linéaire ou non linéaire des déplacements et surtout de la fréquence d'échantillonnage des récepteurs utilisés (Barbero-Alvarez et coll., 2010 ; Portas et coll., 2010 ; Beanland et coll., 2014). Une étude de Castellano et coll. (2011) montre par exemple que pour une distance de 15 mètres les mesures faites par un GPS MinimaxX V4.0 (10 Hz) s'échantillonnaient de 11,1 mètres à 14,9 mètres. Pour un test sur une distance de 30 mètres les distances mesurées fluctuaient de 26,1 à 30,3 mètres.

Compte tenu des déplacements en sports collectifs, les données fournies par le GPS doivent être interprétées avec une grande précaution compte tenu des marges d'erreur (5 à 20 %). La relation linéaire entre la vitesse et la fréquence cardiaque ne semble pas non plus a priori évidente. En cyclisme la vitesse peut être rapide et la fréquence cardiaque relativement basse. C'est le cas lors d'une descente. Il en est de même lors d'une mêlée au rugby. La vitesse est quasi nulle, les données du gyroscope quasi stables et la fréquence cardiaque du sportif moyennement élevée alors qu'il fournit un effort très intense.

Buchheit et coll. (2014), en comparant 50 GPS de différents modèles d'un même constructeur attachés à un chariot, les logiciels dédiés et leurs mises à jour (15 SPI- proX, chip version 2.3.4, and 35 SPI-proX2 [17 SPI- proX2a, chip version 2.6.1, and 18 SPI-proX2b, 2.6.4], 15 Hz, GPSports, Canberra, Australie) incitent les utilisateurs de ses appareils à la plus grande vigilance, car les mesures des accélérations positives et négatives sont particulièrement l'objet d'une très grande variabilité.

Gomez-Piriz et coll. (2011) montrent également que le « total body load ³⁹ » fournit par le GPS ne semble pas un outil valide pour quantifier la charge d'entraînement. Comparé avec une échelle de perception de l'effort et la fréquence cardiaque, les relations sont faibles et non linéaires bien que significatives.

Le GPS ne semble pas pouvoir être utilisé comme marqueur de la CE, car une même vitesse n'induit pas une même dépense énergétique. C'est-à-dire qu'il ne peut mesurer et quantifier l'énergie qui est le reflet réel du niveau d'intensité de l'effort car le coût énergétique de la locomotion n'est pas constant et toute la dépense énergétique n'est

³⁹ La traduction française de « total body load » nous semble difficile et ne pas avoir d'équivalent explicite.

pas de la dépense de locomotion. Les outils de mesure de la puissance (SRMTM, PowerTapTM ou pédales Look Kéo Power en cyclisme) sont dans une moindre mesure influencés par cette limite.

1.4.3- Marqueurs perceptifs

1.4.3.1- Estimation subjective

Foster et coll. (1995, 1998, 2001a) proposent une approche où il ne s'agit pas tant de calculer la CE pour prédire la performance, que d'estimer un niveau d'aptitude.

Score	Description
0	Repos
0,5	Très, très faible
1	Très faible
2	Faible
3	Modéré
4	Un peu difficile
5	Difficile
6	-
7	Très difficile
8	-
9	-
10	Très, très difficile

Tableau 5 : Échelle de perception de l'effort (EPE) de Foster et coll. (2001a)

La méthode est basée sur l'effort perçu par le sportif (tableau 5). Foster et coll. (1995, 1998, 2001a) utilisent des versions modifiées de l'échelle de Borg G. (1985) pour estimer l'intensité de l'entraînement. Leur objectif est de quantifier la charge d'entraînement d'activités ou de sports comportant des intensités très importantes et de déterminer des stratégies optimales de répartition de la charge d'entraînement afin de prévenir les risques de surentraînement et de blessures. De nombreuses études ont intégré S-RP⁴⁰ pour évaluer la charge d'entraînement des séances (Day et coll., 2004 ; Impellizzeri et coll., 2004 ; Herman et coll., 2006 ; Manzi et coll., 2010 ; Minganti et coll., 2011 ;

⁴⁰ S-RPE : Séance-RPE. Niveau de difficulté moyen pour toute la séance.

Wallace et coll., 2009 et 2013)

Le niveau d'aptitude ⁴¹ est estimé par quatre calculs successifs.

Dans un premier temps, la CE (S-RPE) est définie comme le produit du volume (exprimé en minutes) par le niveau de difficulté moyen de la séance (en unités arbitraires basées sur une échelle de perception de l'effort ; tableau 5).

$$CE = \text{Durée} \times EPE \quad (\text{Équation 47})$$

Foster et coll. (1998) définissent ensuite un indicateur de variabilité de l'entraînement, appelé monotonie ⁴² estimée par :

$$\text{Monotonie} = \frac{\bar{x}_{CE(quo)}}{\sigma_{CE(quo)}} \quad (\text{Équation 48})$$

Où $\bar{x}_{CE(quo)}$ est la moyenne hebdomadaire des CE quotidiennes et $\sigma_{CE(quo)}$ est l'écart-type hebdomadaire des CE quotidiennes. Il faut ici être très vigilant à ne pas faire la moyenne des CE de l'ensemble des séances de la semaine, mais bien la moyenne hebdomadaire des CE quotidiennes.

La monotonie est un indicateur de la variabilité de l'entraînement. Foster et coll. (1998) notent que les augmentations de la charge d'entraînement et de la monotonie peuvent engendrer surmenage et maladies, et conseillent de préserver dans la semaine un niveau minimal de variation de la charge d'entraînement afin de faire baisser la monotonie. Nous pouvons noter à cet égard qu'une seule journée suffit déjà à faire varier la monotonie. Il est intéressant, peut-être même surprenant, de noter que mathématiquement la monotonie est l'inverse du coefficient de variation ce qui aura pour inconvénient majeur de bloquer le calcul quand un sportif aura une CE identique chaque jour de la semaine (écart-type de 0).

Foster et coll. (1998) définissent alors un indice de contrainte ⁴³, qui est un marqueur lié aux adaptations négatives de la CE et au surmenage ou au surentraînement.

$$\text{Contrainte} = CE \times \text{Monotonie} \quad (\text{Équation 49})$$

⁴¹ Traduction libre de « fitness »

⁴² Traduction libre de « monotony »

⁴³ Traduction libre de « strain »

Une contrainte plus importante que la CE fera diminuer le niveau d'aptitude. Ce sont les variations respectives de ces deux paramètres qui feront varier le niveau d'aptitude à la hausse comme à la baisse.

$$Fitness = CE - Contrainte \quad (\text{Équation 50})$$

Le niveau d'aptitude est un indicateur associé à la capacité de performance temporaire du sportif. Foster et coll. (1998) notaient aussi que des problèmes de santé survenaient très souvent lorsque les indices de monotonie et de contrainte atteignaient des valeurs très élevées. 84 % des maladies étaient précédés d'un pic de CE. 77 % étaient précédées d'un pic de monotonie.

L'intérêt majeur de cette méthode est qu'elle permet de quantifier des activités très variées et permet de d'objectiver l'apparition du surentraînement et des problèmes de santé (Foster et coll., 1998).

Elle permet de mieux représenter graphiquement les microcycles d'entraînement ce qui facilite la tâche des entraîneurs. Considérant que le manque de variabilité de la CE est un facteur important conduisant au surentraînement (Quinn et coll., 2006 ; Bompa & Haff, 2009⁴⁴), nous pouvons considérer que la monotonie est une plus-value importante de cette méthode même si son calcul peut sembler surprenant.

Ces principales limites tiennent à la non-différenciation des influences respectives du volume et de l'intensité, mais surtout à son caractère hebdomadaire. La CE reste identique quelles que sont les combinaisons des CE dans la semaine. S'entraîner du lundi au jeudi et se reposer du vendredi au dimanche sera identique à s'entraîner un jour sur deux. Bien que la CE puisse être calculée quotidiennement, la semaine doit cependant être totalement écoulée pour calculer la monotonie, la contrainte et le « fitness ».

Grappe et coll. (1999) proposent une méthode simple de quantification de la CE en cyclisme. Le volume et l'intensité nécessaires pour le calcul sont déterminés en fonction respectivement, de la durée de l'exercice et d'une échelle d'Estimation Subjective de l'Intensité de l'Exercice (échelle d'ESIE) composée de 7 items (tableau 6).

⁴⁴ Page 39

Zone	Intensité	Perceptions	Fréquence cardiaque	Puissance de travail	Temps limite
7	Maximale	Aucune douleur musculaire. Impression d'exercice en apnée	Non significative	250 % PMA	4 à 7 sec.
6	Sous maximale	Souffrance extrême durant l'exercice	Non significative	150 % PMA	30 à 60 sec.
5	Surcritique	Augmentation rapide de la douleur musculaire- Conversation très difficile en fin d'exercice	> 96 % FC max	100 % PMA	3 à 7 min.
4	Critique	Conversation difficile- Épuisement important à partir de 20 minutes	92 à 86 % FC max	75 à 80 % PMA	20 à 60 min.
3	Soutenue	Début des douleurs- Épuisement sur deux heures	85 à 92 % FC max	65 à 75 % PMA	1 à 2 h.
2	Moyenne	Aucune douleur musculaire- Maintien aisée de l'intensité- Conversation aisée	75 à 85 % FC max	50 à 65 % PMA	<à 5h.
1	Légère	Aucune douleur musculaire- Conversation très aisée	<75 % FC max	<50 % PMA	-

Tableau 6 : Échelle d'estimation de l'intensité de l'exercice (ESIE)
Grappe et coll. (1999)

L'échelle comporte sept zones d'intensités identifiées par des repères caractéristiques et des perceptions spécifiques au cyclisme. La quantification de la CE à partir de l'ESIE est représentative de l'effort fourni par le coureur (Grappe et coll., 1999).

La CE mécanique d'un exercice peut se calculer comme suit :

$$W_E = PA \times Durée$$

(Équation 51)

Où W_E est la CE en joules arbitraires (JA), PA est la puissance arbitraire correspondante à l'intensité perçue sur l'ESIE.

En complément du calcul de la CE, Grappe et coll. (1999) calcule un indice de fatigue subjective qui est la moyenne des scores de perception de sensation et d'humeur

obtenue à des échelles numériques comportant quelques repères textuels (cotées sur 10) (tableaux 7 et 8).

Score	Description
1	Super forme, super sensations
2	-
3	Forme, sensations, récupération acceptables
4	-
5	Sensations et récupération variables
6	-
7	-
8	Mauvaises sensations
9	-
10	Épuisé, rien envie de faire

Tableau 7 : Échelle de sensations (Grappe et coll. 1999)

Score	Description
1	De très bonne humeur
2	-
3	Bien
4	-
5	Détendu
6	-
7	-
8	Anxieux
9	-
10	Déprimé

Tableau 8 : Échelle d'humeur (Grappe et coll. 1999)

Cette méthode est utilisée par de nombreux coureurs amateurs et professionnels.

Commentaires

L'échelle de perception de l'effort la plus connue est celle de Borg G. (1962 et 1970). Elle a servi de base à la création de nombreuses autres échelles de perception. Basée sur l'observation qu'au cours d'un exercice la fréquence cardiaque varie en moyenne de 60 à 200 bpm, l'échelle est notée de 6 à 20 et accompagnée de courtes expressions verbales facilitent l'évaluation de l'effort par le sportif. Borg G. (1982) note cependant que son utilisation au niveau individuel doit rester prudente car les variations de la fréquence cardiaque sont multifactorielles (âge, genre, environnement, anxiété, heure).

La perception d'un effort n'évoluant pas de façon linéaire avec l'intensité de celui-ci, l'échelle de Borg CR10 (1982) (Tableau 9) a été construite sous la forme d'une fonction puissance de la forme :

$$EP = a + c.S^i \quad (\text{Équation 52})$$

Où EP est l'intensité de la perception, a est une constante en rapport avec le bruit perceptif résiduel, et S, l'intensité du stimulus. En général, l'exposant i de S est égal à 1,6. C'est sur cette base que l'échelle CR10 a été proposée (Borg & Borg, 1987 et 1994)

Delignières D. (1993) note que les travaux basés sur la construction d'échelles de rapport ont débouché sur des résultats légitimant une approche psychophysique de la perception de l'effort, précisant que l'exposant de la relation intensité objective-effort perçu dépendait de la nature de la tâche utilisée. Borg & Borg (1987) montrent que les relations entre l'intensité objective et la fréquence cardiaque diffèrent suivant les activités physiques (valeur de l'exposant i : 2,9 pour la marche ; 1,1 pour la course ; 1,3 pour le pédalage).

Delignières D. (1993) montre également que, quel que soit le type d'effort réalisé, l'effort perçu est une transformation puissance de la fréquence cardiaque, d'exposant i proche de 3,3 et suggère qu'il serait plus pertinent de rechercher au niveau des variables physiologiques que de celui de l'intensité objective les déterminants de la perception de l'effort.

Score	Description
0	Rien
0,5	Très, très faible
1	Très faible
2	Faible
3	Modéré
4	Un peu dur
5	Dur
6	-
7	Très dur
8	-
9	Très, très dur
10	Maximal

Tableau 9 : Échelle CR-10 (Borg G., 1982)

De nombreuses études ont étudié les relations entre les échelles de perception de l'effort (EPE) et d'autres paramètres. Psycharakis S.G. (2011) note qu'avec des nageurs, l'EPE s'est avérée être une méthode valable pour le contrôle de l'intensité de l'exercice, avec des coefficients de corrélation de 0,85 avec le pourcentage de fréquence cardiaque maximale et de 0,82 avec le taux de lactate sanguin.

Mais Coutts et coll. (2009) notent que combiné avec le pourcentage de fréquence cardiaque, le taux de lactate voit sa corrélation avec l'EPE nettement améliorée avec des

joueurs de football lors de jeux à effectifs réduits. Kang et coll. (2009) ont également montré que la durée de l'exercice n'affectait que peu la précision de l'EPE et Hornsby et coll. (2013) notent que la répartition d'exercices intenses dans la séance n'a pas d'impact sur l'EPE moyenne de la séance.

Crewe et coll. (2008) concluent leur étude en notant que le taux d'augmentation de EPE prédit la durée de l'exercice jusqu'à l'épuisement pour une puissance constante dans des conditions environnementales différentes. Postérieurement, Garcin et coll. (2011) ont montré la validité d'une échelle basée sur la prédiction du temps d'épuisement, en complément de l'EPE, pour mieux comprendre comment l'exercice est ressenti par le sportif (Estimation du Temps Limite, ETL).

Le polymorphisme de l'échelle de perception de l'effort en fait un outil pratique et non invasif pour toutes les conditions d'entraînement. Les corrélations obtenues vont de modérées à fortes, en fonction du niveau des pratiquants et du type de sport investigué : football (Impellizzeri et coll., 2004), rugby (Coutts et coll., 2003) basket (Foster et coll., 2001a), kayak (Diafas et coll., 2007), course à pied (Foster C., 1998 ; Seiler et Kjerland, 2006), musculation (Day et coll., 2004), taekwondo (Perandini et coll., 2012), karaté (Milanez et coll., 2011), gymnastique rythmique (Douda et coll., 2006), danse (Liederbach et coll., 1992) et réathlétisation (Ben Belgith et coll., 2013).

Une étude de Sylta et coll. (2013) montre en outre que les athlètes d'endurance de haut niveau rapportent leurs données d'entraînement avec précision, même si quelques petites différences ont été observées en raison de l'absence d'un référentiel de notation.

Néanmoins, nous pouvons nous interroger sur l'effet de l'absence de description pour les scores 6 et 8 de l'échelle de Borg CR10. Il semble difficile pour un sportif de choisir le score 6 (entre le score 5, « Dur » et 7, « Très dur »). Il en est de même pour le score 8 (entre « Très dur » et « Très très dur »). Une autre interrogation porte sur la possibilité de mémoriser les chiffres et de pré-attribuer une valeur numérique à un type de séance (musculation, étirements)

Il est important de noter que les échelles EPE ne mesurent pas uniquement l'intensité de l'effort comme peuvent le faire un pourcentage de la vitesse et un

pourcentage d'un record en musculation. Sheppard et coll. (1992) traduisent en effet l'intitulé de l'échelle de Borg, « *How hard do you feel this exercise is ?* » par « *A quel niveau de pénibilité percevez-vous l'effort effectué ?* ». En ce sens, elle est un indicateur du stress physique général (Garcin & Billat, 2001). L'estimation de l'intensité repose en effet sur des facteurs perceptifs (douleurs musculaire, articulaire), physiologiques (VO_2 , ventilation) et mécaniques (force, vitesse...). Elle quantifie alors la pénibilité perçue, en particulier celle de sa capacité de travail, et de son évolution en fonction de sa durée ou de son environnement.

Il convient également de prendre en compte la très grande variabilité des valeurs de EPE pour des sujets réalisant le même exercice à la même charge relative ($EPE=14 \pm 2,3$ à 50% du temps limite pour un exercice réalisé à 60% de la puissance maximale aérobie (Garcin et coll., 1998). Vautier J.F. (1994) note qu'à la cinquième minute d'un exercice à charge constante jusqu'à épuisement, des sujets notent « Difficile » l'exercice qu'ils vont pratiquer plus d'une heure, alors que d'autres sujets ne pourront le pratiquer que 15 minutes.

Le frein majeur à l'utilisation des échelles visuelles analogiques reste cependant l'outil de collecte de la perception du sportif. Il doit permettre une saisie rapide et strictement individuelle. La faible ergonomie de la réglette et du carnet et du crayon peut amener le sportif, mais aussi l'entraîneur à abandonner le recueil des données après quelques semaines de saisie.

À RETENIR

Pour modéliser l'entraînement et ses effets sur la performance, mais aussi gérer la dynamique des CE pendant le plan d'entraînement, il est indispensable de quantifier l'entraînement et la performance.

Le choix du marqueur est alors déterminant pour la quantification de la CE.

La grande variété de types de séances oblige l'entraîneur à utiliser différents outils et différentes unités de mesure.

L'utilisation du cardiofréquencemètre et du GPS s'est beaucoup généralisée dans le monde sportif amateur et professionnel, ce qui conduit la fréquence cardiaque à être le principal marqueur quantitatif.

Toutefois, le polymorphisme de l'échelle de perception de l'effort lui permet d'être le marqueur qualitatif le plus utilisé, notamment dans les sportifs collectifs.

Afin d'exploiter pleinement les données, il conviendra de les normaliser pour rendre les mesures comparables, avec comme limite la dégradation de la qualité de la modélisation. Cela impose le plus souvent d'utiliser des coefficients pondérateurs et des unités arbitraires.

1.5- SYNTHÈSE

L'intérêt pour les systèmes mathématiques d'analyse et de modélisation des effets de l'entraînement a été très important dans les années quatre-vingt-dix et deux mille. Initié par Banister et coll. (1975), le modèle original a fait l'objet de variantes, sans réellement remettre en question son algorithme fondamental : le concept stimulus-réponse. La démarche consiste alors à tenter d'identifier les réponses et à repérer les stimuli qui les provoquent. La séquence de causes et d'effets forme donc une boucle dite boucle de rétroactions positives, qui amplifient la performance, et négatives, qui la diminuent. Cette séquence a fait l'objet de nombreuses études et combine plusieurs paramètres entre eux. Cette approche reste peu robuste, car nous ne pourrions jamais modéliser complètement un système aussi complexe que l'organisme humain. Il est donc nécessaire de faire des choix, un peu arbitraires, sur les facteurs à prendre en compte.

1.5.1- Stimulus : la notion de CE.

Bien que complexes, les recherches sur la notion de CE sont d'un intérêt majeur pour la périodisation de l'entraînement pour aider les entraîneurs confrontés à de multiples incertitudes. Par exemple, entre exigences de fortes CE et nécessité de récupération, avec comme alternatives possibles à une performance de haut niveau, le surmenage, le surentraînement et la blessure. La quantification de la CE, notamment quotidienne, est alors la première étape de la périodisation de l'entraînement. C'est la valeur d'entrée de toute modélisation des effets de l'entraînement.

Deux catégories principales regroupent les différentes méthodes de quantification de la CE : les méthodes basées sur les données physiologiques et mécaniques et les méthodes basées sur les perceptions de l'effort.

Les premières représentent des mesures essentiellement quantitatives. La principale difficulté réside dans le fait qu'il est difficile d'établir une relation de cause à effet entre charge d'entraînement et données physiologiques. La réponse des indicateurs physiologiques peut être aussi quelque peu déphasée par rapport aux entraînements et ces mesures, plus ou moins invasives, peuvent également être coûteuses à obtenir sur le

terrain.

Les secondes représentent des mesures qualitatives qui consistent à demander au sportif d'évaluer lui-même certains paramètres à la fin d'un entraînement ou pendant sa récupération. Elles ont pour qualité première d'être adaptables aux différents environnements d'entraînement et d'être peu onéreuses. Les données mesurées varient sensiblement suivant le sportif et l'instant de la collecte.

Les conditions de pratique, les adversaires, les caractéristiques du sportif sont autant de paramètres qui peuvent influencer la performance finale (Banister et coll., 1975 ; Busso T., 2003 ; Morton et coll., 1990 ; Mujika et coll., 1996 ; Wakayoshi et coll., 1993). On peut donc avoir une grande capacité de performance (c.-à-d., être en grande forme) et ne pas être pour autant performant dans l'activité de compétition. Ce constat est fréquent dans les sports collectifs professionnels où l'influence de l'adversaire est déterminante sur le résultat final et où la différence se fait souvent sur la valeur intrinsèque du joueur. Leur capacité et leur précision de prédiction sont donc fortement dépendantes, outre les caractéristiques des sujets, de la nature, de la validité et de la sensibilité des marqueurs, le plus souvent biologiques.

1.5.2- Réponse : l'état de fatigue

L'organisation de l'entraînement est subordonnée à la nécessité d'être performant en compétition et de s'entraîner le plus possible pour progresser. La CE provoque une baisse de l'aptitude, la récupération un retour à la valeur initiale et, si la charge d'entraînement a été suffisante, une amélioration. Cette relation entraînement-récupération (c.-à-d., travail-fatigue) constitue la classe de tous les rythmes d'une périodisation efficace de l'entraînement : l'oscillation en tant que fluctuation périodique. Bompa T.O. (1985)⁴⁵, Werchoschanski J.W. (1992)⁴⁶, Kelly & Coutts (2007) et Issurin V.B. (2008 et 2010) notent que la répartition cohérente des CE et des cycles est un des principes de base de la planification, ce qui tend à mettre en évidence son caractère non linéaire et non monotone.

⁴⁵ Page 79

⁴⁶ Page 102

La fatigue se révèle donc être un des meilleurs révélateurs du stimulus d'entraînement. Objectiver la réponse, c'est-à-dire l'expression d'un état de fatigue transitoire, consiste à trouver une procédure d'évaluation de la capacité du sportif à réaliser des performances maximales, qui soit suffisamment valide, sensible et reproductible. La récupération aura donc pour intérêt d'atténuer la fatigue pour enchaîner plus rapidement d'autres stimulus d'entraînement sans pour autant les faire disparaître, puisqu'ils sont les précurseurs des adaptations espérées pour améliorer le niveau de performance.

La gestion de la récupération est d'autant plus complexe qu'à la suite d'un arrêt, les durées de maintien de l'aptitude semblent spécifiques au type de compétences acquises et à l'expérience. Bompa T.O. (1985)⁴⁷ note une cinétique de récupération de la performance en force plus longue pour des sportifs juniors et pour des sportifs ayant une moindre expérience de l'entraînement que pour des sportifs entraînés.

1.5.3- Précision des modèles

L'outil statistique le plus utilisé pour mesurer l'adéquation du modèle à la performance réelle est le coefficient de détermination. Hormis dans le cas de régressions linéaires où il est le carré du coefficient de corrélation, il n'y a pas de consensus quant à sa définition et il est parfois défini comme la part de variance expliquée sur la variance totale. Le coefficient de détermination ajusté intègre le nombre de variables pour atténuer le principal défaut du coefficient de détermination qui augmente avec le nombre de variables.

Il n'est pas rare de voir également utiliser l'écart moyen relatif entre la performance prédite et la performance réalisée, estimé par la moyenne des écarts à la moyenne sur cette même moyenne (exprimé en pourcentage). Le tableau 10 synthétise différentes études basées sur le modèle de Banister et coll. (1975). Les nombreux coefficients utilisés pour mesurer leur précision rendent les comparaisons difficiles.

⁴⁷ Page 209

Auteurs	Année	Sport	Sujet	Semaines	Précision	Coefficient
Busso et coll.	1990	Haltérophilie	6 hommes	52	0.50-0.97	*
Morton et coll.	1990	Course	2 hommes	4	0.71 ; 0.96	*
Busso et coll.	1991	Cyclisme	8 hommes	14	0.76-0.93	*
Busso et coll.	1994	Lanceur de marteau	1 homme	37	0.91	*
Mujika et coll.	1996	Natation	8 femmes, 10 hommes	50	0.45-0.85	*
Busso et coll.	1997	Cyclisme amateur	2 hommes	14	0.66 ; 0.68/0.87 ; 0.87	*
Busso et coll.	2002	Cyclisme	6 hommes	15	0.95-0.98	*
Millet et coll.	2002	Triathlon	3 femmes, 1 homme	40	0.37-0.74	***
Busso T.	2003	Cyclisme	6 hommes	15	0.85	**
Wood et coll.	2005	Course amateur	1 homme	12	0.92	*
Hellard et coll.	2006	Natation	5 femmes, 4 hommes	60	0.79	*
Torrents et coll.	2007	Gymnastique	2 femmes	18	5.06 %- 10.62 %	****

*=coefficient de détermination

**=coefficient de détermination ajusté

***=coefficient de corrélation

****=écart moyen relatif

Tableau 10 : Description des études basées sur le modèle de Banister et coll. (1975)

Selon Hellard et coll. (2006), les explications probables au problème de précision peuvent être : 1) la faible quantité de données, conséquence de la difficulté d'investiguer le sport de haut niveau, 2) l'interdépendance des paramètres du modèle, qui devraient certainement être recalculés au fur et à mesure de l'avancement dans la saison, 3) les biais du modèle, notamment celui énoncé par Fitz-Clarke et coll. (1991). Mais la limite majeure est 4) la colinéarité illimitée de la relation entraînement-performance. Plus on s'entraîne, plus on progresse n'est pas applicable au corps humain.

La modélisation des effets de l'entraînement sur la performance permet de mieux conceptualiser la complexité de l'entraînement, mais elle ne permet pas de prédire avec une grande précision la performance, d'autant plus à haut niveau où les titres, podiums et qualifications se dessinent au centième ou au millième de seconde. Ce problème est encore

plus exacerbé dans les sports de confrontations directes avec un ou des adversaires. Pour l'entraîneur, la modélisation semble donc devoir être plus utilisée comme un outil d'aide à la décision que comme un outil de prédiction.

Malgré des années de recherches, il ne semble pas exister de marqueurs physiologiques de l'aptitude ou de la fatigue, d'autant plus que les adaptations à un même entraînement sont individuelles et que la réponse à un même entraînement sera dépendante des séances précédentes.

De plus, les marqueurs physiologiques sont encore aujourd'hui difficiles à récupérer en routine quotidienne sur les lieux d'entraînement, ce qui rend complexes l'analyse et la conception des entraînements.

Dans le domaine de la modélisation des effets de l'entraînement, la robustesse⁴⁸ est un concept récurrent. Vouloir ajouter trop de paramètres ou avoir une architecture trop sophistiquée conduit au surparamétrage. Inversement, si le nombre de paramètres est trop faible, le modèle est moins précis et il y a sous-paramétrage. Dans les deux cas de figure, on perd en robustesse. Il s'agit donc de trouver le bon compromis précision-variance. Les différentes études basées sur le modèle de Banister et coll. (1975) n'ont pas toujours permis de réduire le nombre de paramètres, mais ont montré la nécessité de leur recalcul.

De plus, les modèles mathématiques actuels de prédiction de la performance sont, pour des raisons pratiques, le plus souvent testés avec des sportifs sédentaires dans des activités sportives sans interaction directe avec un adversaire. Ils ne peuvent donc exister que pour un nombre très restreint de sports individuels, principalement de confrontation avec le temps et/ou l'espace (la course, la natation).

1.5.4- Perspectives

Un entraînement efficace implique une CE toujours plus importante, mais doit aussi prévenir les surcharges qui sont le résultat de trop faibles temps de récupération qui peuvent provoquer des déséquilibres fonctionnels préjudiciables. Différencier un dépassement temporaire de possibilités d'un syndrome de surentraînement est très difficile,

⁴⁸ Capacité à généraliser les conclusions d'une analyse statistique.

les sportifs manifestant souvent les mêmes symptômes. C'est souvent la durée des désadaptations qui sera le signal initial (Meeusen et coll., 2013).

La principale et importante limite de la très grande majorité des modélisations tient en ce qu'elles ont une limite infinie, c'est-à-dire que dans la majorité des cas plus la charge d'entraînement (CE) augmente, plus la capacité de performance quotidienne (CPQ) progresse, ce qui n'est pas réaliste dans le cadre de l'entraînement sportif. Aucune méthodologie de quantification de la CE n'intègre un système d'information de dépassement de capacité (surcharge) ou d'insuffisance de sollicitation (sous charge).

Une approche pour comprendre l'étiologie du surentraînement, mais aussi du sous-entraînement, consiste sans doute à suivre plusieurs marqueurs non spécifiques, qu'ils soient biologiques ou psychologiques, afin de détecter dans leurs variations respectives les zones de transition individuelles qui font passer le sportif de l'entraînement efficace au sous-entraînement ou au surentraînement. Cette approche devrait aussi pouvoir permettre d'identifier les réactions d'alarme (Hooper et coll., 1997 ; Meeusen et coll., 2013)), si elles existent, qui conduisent à la blessure. En effet, tous les chercheurs s'accordent pour dire qu'il n'y a actuellement aucun marqueur suffisamment sensible, fidèle et reproductible de la fatigue, ce qui rend difficile la compréhension des phénomènes d'adaptation aux efforts.

Les évaluations de l'effort, de l'humeur, du sommeil ou de la douleur se basent principalement sur ce qu'en rapporte le sportif. Des échelles d'évaluations ont été développées afin d'être utilisées par le sportif lui-même comme l'échelle de Borg, une des échelles visuelles analogiques les plus connues, initialement utilisée dans le diagnostic médical.

1.5.4.1- Intensité perçue

Les relations complexes entre charge d'entraînement et effets sur la performance ont été initialement modélisées par Banister et coll. en 1975 et Calvert et coll. en 1976. La charge d'entraînement (Werchoshanski J.V., 1985)⁴⁹, envisagée comme l'effort que fait le sportif pour répondre aux exigences de l'entraînement, implique une évaluation de l'effort

⁴⁹ Page 96

quant à la mobilisation de ses capacités et de la motivation pour faire cet effort (Morin et coll., 2014).

En rupture avec les méthodes traditionnelles qui utilise le lactate (Mujika et coll., 1996), la fréquence cardiaque (Edwards S., 1993) ou la vitesse (Hayes & Quinn, 2009) pour mesurer l'intensité de l'effort pour calculer la charge d'entraînement et estimer les effets de l'entraînement sur la performance, Foster et coll. (1995) multiplient un paramètre objectif, la durée d'effort, avec un paramètre subjectif, la perception de l'intensité de l'effort. Un des avantages majeurs, outre sa validité dans de nombreux contextes (Foster et al, 2001a), est sa capacité à pouvoir mesurer l'intensité de différents types d'entraînement (p. ex. : aérobie, musculation) (Singh et coll., 2007) et sa facilité de mise en œuvre sur le terrain. Elle ne nécessite aucun appareillage et ne perturbe donc pas les séances. Cette méthode de quantification de la charge d'entraînement, expression d'une approche systémique, a montré sa validité dans de nombreuses études (Hooper et coll., 1999, Foster et coll., 2001a, Alexiou et Coutts, 2008 ; Impellizzeri et coll., 2004), et pour de nombreux sports.

1.5.4.2- Fatigue

La fatigue s'objective par une dégradation du niveau de performance (Asmussen E., 1979 ; Bigland-Ritchie & Woods, 1984). Elle concerne aussi bien le potentiel énergétique et neuromusculaire que les aspects subjectifs tels que le stress ou la motivation. La fatigue est donc une conséquence à court, moyen et long terme d'un entraînement s'exprimant par des symptômes objectifs et subjectifs (Enoka & Stuart, 1992) : variations des performances, signes physiologiques d'un déséquilibre homéostatique (Milanez et coll., 2014), modifications psychologiques (Raglin, J.S., 2001).

Souvent identifiée comme un symptôme d'une maladie ou comme les conséquences d'une activité épuisante, la fatigue est essentiellement une expérience subjective et un phénomène physiopathologique complexe. Elle peut être d'origine centrale ou périphérique et dépendre aussi du genre. Glace et coll. (2013) montrent qu'après deux heures de pédalage la fatigue est d'origine centrale et périphérique chez l'homme, mais d'origine centrale chez la femme. Marcora, S. (2010) note que la littérature scientifique est

abondante sur ce sujet, parce qu'elle est, occasionnellement ou fréquemment, au centre des préoccupations de nombreuses personnes. La fatigue musculaire fait donc partie du quotidien du sportif qui s'entraîne régulièrement. Meeusen et coll. (2013) notent ainsi que l'entraînement peut être défini comme un processus de surcharge destiné à perturber l'homéostasie, ce qui entraîne une fatigue aiguë conduisant à une amélioration de la performance. Mais si l'équilibre entre entraînement et récupération n'est pas suffisamment respecté, les premiers signes d'un stress d'entraînement prolongé, comme l'augmentation de la fatigue perçue ou la dégradation de l'enthousiasme, peuvent apparaître.

Avec la prise en compte croissante de la fatigue comme un phénomène majeur de l'entraînement, il semble intéressant d'en suivre l'évolution, notamment en comparaison avec d'autres marqueurs. Hagin et coll. (2012) montrent ainsi que la stratégie de gestion du sommeil d'un navigateur (5,4 heures par jour, soit 24 % de moins qu'à terre) était suffisante pour conserver un niveau d'anxiété et de fatigue perçue dans des limites acceptables lui permettant d'atteindre son objectif qui était de traverser l'océan Pacifique sur un catamaran de moins de six mètres.

Kenttä et coll. (2006) crée un indice d'énergie qui consiste à soustraire le score de fatigue du score de vigueur du POMS. Ils montrent que pour des kayakistes de haut niveau cet indice d'énergie est sensible aussi bien à l'entraînement qu'à la récupération alors que le score de dépression ne change pas.

1.5.4.3- État d'esprit

L'entraînement doit se rapprocher au plus près des contraintes et exigences de l'exercice de compétition. La capacité à conserver un certain niveau technique et tactique est souvent considérée comme déterminante en compétition et justifie les nombreuses heures d'entraînement (Russel & Kingsley, 2011). Viru et coll. (2010) ont ainsi montré, que pour un exercice incrémentiel sur tapis roulant, les conditions de compétition permettaient une amélioration de la performance de 4,2 % et une élévation du pic de VO₂ de 3,9 %, mais qu'il n'y avait pas de différence au niveau de la lactatémie, du cortisol, des hormones de croissance et de la testostérone. Leurs résultats mettent en évidence que, dans des situations de compétition, le niveau affectif contribue à améliorer les performances et

conduit à une augmentation du pic de VO₂.

Le Recovery-Stress Questionnaire for Athletes (RESTQ-Sport) et le Profile of Mood State (POMS) ont mis en évidence des relations entre la charge d'entraînement, l'état d'esprit et le niveau de récupération (Kellmann & Kallus, 2001) et entre charge d'entraînement, confusion et performance durant la période d'affûtage (Hooper et coll., 1999). Déterminant à haut niveau, l'état d'esprit du sportif pourrait influencer les choix techniques et tactiques et serait en relation avec la charge d'entraînement, ce qui pourrait expliquer son manque de fraîcheur en période d'entraînement intensif (Raglin, J.S., 2001) et les variations de qualité de ses adaptations et de ses apprentissages (Toering et coll., 2009).

Cockerill et coll. (1991) ont montré qu'en utilisant les données d'une première course de cross-country, un modèle à multiple variable, intégrant l'interdépendance de tension, angoisse, et dépression du POMS, il était possible de prédire la place finale d'un groupe d'athlètes expérimentés dans une seconde course avec une précision acceptable ($r=0,74$, $p<0,01$). Ils notèrent néanmoins qu'il était très probable que pour les sports aux exigences très différentes de celle du cross-country un modèle alternatif devait être envisagé.

Des études ont également constaté des scores de dépression et d'angoisse du POMS importants chez des sportifs en état de surmenage non fonctionnel (Schmikli et coll., 2011). Les échelles de stress émotionnel, de récupération physique, de bien-être général et de qualité du sommeil du RESTQ-Sport sembleraient être aussi sensibles au surentraînement (Brinks et coll., 2012).

1.5.4.4- Endormissement - Sommeil

Bien que de nombreuses études semblent démontrer un effet assez mineur du manque de sommeil sur la performance sportive (Reilly & Deykin, 1983 ; Sinnerton & Reilly, 1992 ; Reilly et coll., 2007), il apparaît que le manque de sommeil influence négativement sur plusieurs paramètres physiologiques et psychologiques, perturbant à moyen terme les processus de récupération et donc la capacité d'entraînement (Samuels C.,

2008 ; Bird S., 2013).

Le sommeil serait alors un élément essentiel pour la récupération des athlètes en raison de ses effets réparateurs (Lastella et coll., 2014a). Laureys et coll. (2002) notent ainsi que l'apprentissage perceptif et moteur se poursuit après la séance d'entraînement terminée via des processus se produisant durant le sommeil.

Sommeil et exercice exercent une influence l'un sur l'autre par des interactions bilatérales complexes qui impliquent plusieurs voies physiologiques et psychologiques (Chennaoui et coll., 2015). Les troubles du sommeil pourraient affecter les performances physiques et cognitives et augmenter le risque de blessures (Lastella et coll., 2014a et Poussel et coll., 2014). De nombreux athlètes expliquent ainsi un mauvais sommeil les nuits précédant la compétition par un mauvais endormissement (Juliff et coll., 2014). Toutefois, d'autres sportifs ne sont pas perturbés par la qualité de l'endormissement, mais plutôt par la nervosité liée à la compétition sans que cela semble avoir d'effets sur leurs performances (Erlacher et coll., 2011).

Le manque de sommeil serait source de mauvaise humeur et de perte de motivation (Meney et coll., 1998), mais affecte aussi la performance notamment lorsque les actions à réaliser sont répétitives (Folkard S., 1990 ; Meney et coll., 1998). Plusieurs études ont montré, dès la première nuit de privation de sommeil, une réduction des capacités d'attention et de concentration, des vitesses de réaction et de prise de décision (Edwards et coll., 2009) ce qui peut être potentiellement source de blessures. Dans une étude sur la privation du sommeil sur la conduite d'une voiture en situation réelle, Philip et coll. (2005) montrent que la dégradation des performances est associée avec la privation de sommeil, mais ne l'est pas avec la fatigue perçue. Par contre, associées, elles sont significativement corrélées avec le temps de réaction.

Le repos et le sommeil sont alors pour le sportif le meilleur moyen de rééquilibration pour pouvoir supporter de nouvelles CE. Hooper et coll. (1999) font état d'une légère amélioration de la qualité du sommeil chez sept nageuses de haut niveau après 2 semaines d'affûtage pour préparer le championnat national australien. Ces variations de la qualité et de la quantité du sommeil sont confirmées par Hausswirth et coll. (2014) lors d'une étude de six semaines avec vingt-sept triathlètes. Ils montrent 1) que le

groupe qui a réalisé une période d'entraînement intensif les semaines 2, 3 et 4 a un sommeil perturbé en comparaison avec le groupe témoin et 2) que ces valeurs retrouvent leur valeur d'origine après la période d'affûtage (semaines 5 et 6).

1.5.5- Mesures longitudinales

Dans ce contexte, il semblerait intéressant d'évaluer en parallèle la perception de plusieurs marqueurs (Hooper et coll., 1999, Coutts et coll., 2007 ; Moreira et coll., 2013). Mesurés à chaque entraînement, cela permettrait d'augmenter le nombre de données et, par conséquent, de caractériser et discerner plus précisément les variations de leurs effets (Hellard et coll., 2006). Mieux que ne peuvent le faire les tests de terrain, qui ne peuvent être réalisés que ponctuellement.

Ainsi, les variations de perception de l'intensité moyenne, de l'intensité maximale, de l'humeur, de la maîtrise technique/tactique, de l'endormissement, du sommeil et des douleurs pourraient être observées afin de détecter la présence potentielle d'adaptations individuelles à l'entraînement (Kenttä et coll., 2001 et 2006). Ces adaptations, évolutives durant une saison sportive, pourraient être caractéristiques d'une charge d'entraînement trop faible, optimale ou trop importante, mais également de la stratégie de planification hebdomadaire, et donc être riches d'enseignements en termes de programmation de l'entraînement (Milanez et coll., 2014).

Bien que de nombreuses études fournissent une description détaillée des adaptations physiologiques et psychologiques à l'entraînement, peu d'études (Hooper et coll., 1995 ; Hooper & McKinnon, 1995) ont été consacrées au suivi longitudinal de la perception de ces adaptations systémiques dans la quantification et la gestion de la charge d'entraînement en conditions réelles pendant la totalité d'une saison d'entraînements et de compétitions. Reconnaître les signes d'une adaptation optimale ou excessive (Kenttä et coll., 2006 ; Kellmann & Kallus, 2001) à l'entraînement représente un enjeu important pour la planification des entraînements des sportifs de haut niveau, notamment pour définir les marqueurs qui doivent être utilisés pour gérer le surmenage, le surentraînement et optimiser la relation entraînement/récupération.

2- HYPOTHÈSES DE TRAVAIL ET OBJECTIFS

« [...] If the intended purpose is to develop an instrument to help a coach prescribe a training program for a particular athlete, new modeling strategies should be considered in accordance with the specificity of the activity. »

Busso & Thomas, 2006, page 404

Notre revue de la littérature nous a permis de démontrer que la quasi-totalité des modélisations des effets de l'entraînement sur la performance s'appuie sur les relations, et plus précisément sur la différence, entre les effets positifs et les effets négatifs (Banister et coll., 1975 ; Calvert et coll., 1976 ; Morton et coll., 1990 ; Busso et coll., 1991, 1994, 1997, 2002 ; Foster C., 1998 ; Perl J., 2000, 2001a et 2001b). Les algorithmes utilisés tentent alors de définir une représentation mathématique de la relation entre le stimulus (l'entraînement) et la réponse (la performance). Plusieurs méthodes sont utilisées pour objectiver les entrées du système (Calvert et coll., 1976, Mujika et coll., 1995, Foster et coll., 2001a) mais la performance en compétition est presque toujours le marqueur des sorties (Calvert et coll., 1976 ; Mujika et coll., 1995).

Dans les sports collectifs professionnels, le calendrier des compétitions impose d'importantes charges d'entraînement durant la période de compétition. Plusieurs études ont aussi montré l'importance de faire varier cette charge d'entraînement quotidiennement, mais aussi hebdomadairement, c'est-à-dire d'alterner des périodes d'entraînement faciles et difficiles (Delattre et coll., 2006 ; Esteve-Lanao et coll., 2005 et 2007 ; Seiler & Kjerland, 2006 ; Seiler S., 2010 ; Stöggl & Sperlich, 2014). Manzi et coll. (2010) mettent ainsi en évidence que les stratégies de répartition hebdomadaire de la charge d'entraînement avec des basketteurs professionnels italiens sont dépendantes du nombre de matchs par semaine et de type ondulatoire. Le profil moyen des charges d'entraînement les semaines de compétition avec un match mettait en évidence une courte période de décharge trois jours avant le match, précédée d'une autre courte période de décharge de deux jours.

Il nous paraît donc intéressant de concevoir et d'appliquer une nouvelle méthodologie basée sur les oscillations harmoniques amorties afin de dépasser la conception habituelle de la performance comme la différence entre la fatigue et l'aptitude. S'inscrivant dans les thématiques des travaux en cybernétique et en informatique, cela consiste donc à considérer le corps humain comme un système autorégulé. Il s'agit alors de s'interroger sur les interactions entre la charge d'entraînement et la capacité de performance afin de tenter de la maintenir à un niveau optimal durant toute la période de compétition, mais aussi de minimiser le risque de surmenage et de blessure. Cela implique d'identifier les différentes zones de stimulus efficaces ou à défaut les variations caractéristiques des marqueurs associés. Complémentairement, c'est tenter d'expliquer les adaptations liées à la pratique sportive intensive en respectant les conditions écologiques de ce phénomène complexe et multifactoriel.

Notre premier objectif est de proposer une modélisation mathématique alternative pour représenter les variations générales de la capacité de performance provoquées par les stimuli d'entraînement. Les concepts d'homéostasie et de chronobiologie mettent en évidence que les pics et les creux des rythmes biologiques sont des phénomènes périodiques qui sont représentés sous forme de courbes de fonctions sinusoïdales (Aronson et coll., 1993 ; Cornelissen G., 2014). Le principe est de considérer que les effets de l'entraînement sont plutôt un état non définitif des interactions entre des différents facteurs exogènes et endogènes et que les interactions sont variables avec le temps (Avalos et coll., 2003). Ainsi, il nous semble donc nécessaire de comparer notre modélisation avec le modèle originel de Banister et coll. (1975) dont la validité et la précision ont été maintes fois étudiées et démontrées (Busso et coll., 1991 ; Busso et coll., 1997 ; Morton R.H., 1997 ; Avalos et coll., 2003).

Faute d'outils ergonomiques adaptés aux contraintes du sport professionnel, la quantification de la charge d'entraînement n'est dans les faits que partiellement, ponctuellement ou superficiellement réalisée. Notre second objectif est de proposer un système informatique en ligne permettant la mesure longitudinale de nombreux marqueurs pour mieux analyser et comprendre les réactions du sportif à l'entraînement. Cet outil vise à satisfaire deux caractéristiques principales de tout système d'aide à la décision : l'utilité et l'ergonomie (Halson S.L., 2014). Utilité, car il doit répondre aux besoins des sportifs et

des entraîneurs. Ergonomie, car il doit pouvoir être utilisé avec le maximum de confort et d'efficacité. Un carnet d'entraînement en ligne peut fournir des signaux d'alerte précurseurs du surmenage, du surentrainement ou de la blessure (Cunniffe et coll., 2009 ; Piacentini & Meeusen, 2014). Le recueil longitudinal quotidien de données perceptives doit pouvoir apporter des connaissances complémentaires pour améliorer la gestion individuelle de la CE.

Nous émettons l'hypothèse générale qu'une meilleure description des variations générales de la capacité de performance du sportif et que le suivi à chaque séance de nombreux marqueurs permettent de mieux maîtriser la planification des charges d'entraînement pour synchroniser les périodes de meilleures capacités de performance quotidiennes avec les périodes de compétitions durant toute une saison.

3- APPORT PERSONNEL

« [...] to modeling the effects of training we must rely largely on input-output data (much of it difficult to quantify) with the system initially regarded as a "black box." A long-term aim is to identify successively all the components of the system and to describe their function. In this way, improved models and relevant accompanying experiments may lead to a better understanding of the various component mechanisms involved in exercise. »

Calvet et coll., 1976

Dans ce chapitre

3.1- POSTULAT DE TRAVAIL	97
3.2- MATERIEL ET METHODE.....	115
3.3- SUJETS	131
3.4- ANALYSES STATISTIQUES	136
3.5- RESULTATS	139

3.1- POSTULAT DE TRAVAIL

Pour Werchoschanski J.W. (1985)⁵⁰, l'efficacité des CE dépend de leurs successions adéquates, de telle sorte que les effets retardés des précédentes provoquent des conditions favorables à la réalisation des CE suivantes. Il suggère ainsi que les effets différés à long terme sont un facteur clé de la planification des CE et que les effets de l'entraînement sont cycliques (non linéaires et non monotones) (Rhea et coll., 2002) et se mesurent à l'amplitude du changement d'état du sportif (Werchoschanski J.W., 1985⁵¹).

Avalos et coll. (2003) montrent ainsi, lors d'un suivi longitudinal de trois ans, que les variations des effets de l'entraînement sur la performance de nageurs de haut niveau sont fortement dépendantes du temps. Sur des périodes de huit semaines précédant la compétition, Avalos et coll. (2003) mettent en évidence trois périodes d'entraînement distinctes : 1) une période proche (semaines 1 et 2) pour laquelle la CE est négativement corrélée à la performance pour tous les nageurs. Cette période est retrouvée sous le terme affûtage dans la littérature scientifique (Bosquet et coll., 2007). 2) une période intermédiaire (semaines 3, 4 et 5) caractérisée par une influence moyenne positive pour les trois quarts des nageurs qui confirme l'importance de cette période durant laquelle le volume et l'intensité peuvent être augmentés jusqu'à un certain niveau afin d'obtenir un effet de surcompensation (Thomas & Busso, 2005). Puis 3) une période éloignée (semaines 7 et 8) qui est marquée par des corrélations positives entre le niveau de la CE et la performance pour trois quarts des nageurs (Alvalos et coll., 2003).

Avalos et coll. (2003) notent toutefois que les influences des périodes intermédiaire et éloignée sont significativement différentes de la première à la troisième année et montrent que, malgré des CE identiques, les effets varient avec le temps. Cela semble mettre en évidence que pour maintenir un même niveau de progression, les sportifs doivent vivre des CE plus importantes aussi bien en termes de volume que d'intensité (Morton R.H., 1997 ; Banister et coll., 1999 ; Gaskill et coll., 1999 ; Busso et coll., 2002), et qu'ils ont besoin de temps de récupération plus longs pour assimiler les stimulus d'entraînement (Morton et coll., 1990).

⁵⁰ Page 119

⁵¹ Page 129

Ces résultats mettent en évidence le caractère cyclique, mais aussi individuel (Sultana et coll., 2008) des effets de l'entraînement et traduisent l'accoutumance des sujets aux CE. Mais aussi la difficulté que peuvent rencontrer les entraîneurs lorsqu'ils élaborent leurs plans d'entraînement. Comment augmenter les CE sans réduire les temps de récupération qui doivent eux aussi être suffisants pour permettre des adaptations optimales ?

3.1.1- Préambule

Trois concepts physiologiques fondamentaux influencent notre étude.

En 1929, Cannon W.B. invente et définit le terme d'homéostasie pour mieux comprendre et expliquer les mécanismes de régulation des fonctions de l'organisme déjà connus. Selon Sinding, C. (1993), Cannon W.B. a apporté deux connaissances essentielles : « (...) *en premier lieu il distingue deux modes de régulation des fonctions de l'organisme, l'un mis en jeu dans les situations d'urgence, de stress, le second dans des situations pathologiques moins dramatiques. (...) Il distingue les réserves, alimentaires ou hydriques, rapidement mobilisables (...) des aliments stockés sous forme de métabolites intermédiaires, reconvertis en métabolites immédiatement utilisables par l'organisme en cas de besoin. (...) La deuxième nouveauté (...) consiste à identifier des couples d'agents physiologiques antagonistes (...)* »

Le concept d'homéostasie définit ainsi la capacité qu'à l'organisme à maintenir constant le milieu intérieur face à un environnement changeant. Elle permet par exemple de conserver constante la température interne indépendamment de la température externe. Ce premier concept d'homéostasie induit qu'il existe de fortes relations entre l'organisme et son milieu et que cet équilibre dynamique suppose des régulations de type sinusoïdal.

Lorsque l'homéostasie est perturbée par des variations environnementales, Selye H. (1975) montre que la première réponse de l'organisme au stress⁵² est spécifique et que la deuxième est non spécifique et identique en toutes situations, quel que soit le facteur stressant, qu'il soit biologique ou psychologique. Un ensemble de symptômes non spécifiques apparaît en réponse à « l'agression ». Des trois stades successifs du concept de

⁵² Selye H. définit le stress comme l'ensemble des moyens physiologiques et psychologiques qu'un individu met en œuvre pour s'adapter à un événement précis

Syndrome Général d'Adaptation, la réaction d'alarme (c.-à-d., période « *pendant laquelle les forces de défense sont mobilisées* ») et le stade de la résistance (« *qui reflète la complète adaptation à l'agent stressant* ») sont des stades nécessaires et positifs en terme d'adaptations et d'évolutions. Le stade d'épuisement « *qui suit inexorablement pourvu que l'agent stressant soit assez puissant et agisse assez longtemps, le pouvoir d'adaptation d'un être vivant étant toujours limité* » (Selye H., 1975⁵³) se manifeste alors par des réactions de protection, de défense, de troubles somatiques. Chaque organisme posséderait un syndrome général d'adaptation spécifique et aurait donc une capacité d'adaptation différente et personnelle. Ce deuxième concept, considérant l'organisme dans son ensemble, tend à démontrer que la structure de réponse de l'organisme est presque toujours identique, quel que soit le stimulus, même dans l'éventualité d'un stress extrême.

Dans cette perspective, et de manière complémentaire, nous faisons référence au modèle de régulation du sommeil à deux processus de Bordely A.A. (1982) pour illustrer le troisième concept qu'est la chronobiologie. Bordely A.A. (1982) postule que l'organisation temporelle des états de veille et de sommeil serait le résultat de l'interaction d'un processus homéostatique et d'un processus circadien. Ce processus régule respectivement le besoin immédiat de sommeil et la pression de sommeil en fonction du temps. Ce besoin est dépendant de la durée de veille qui le précède et ce rythme est influencé par le cycle jour/nuit. Le concept de chronobiologie, qui s'intéresse à l'étude des rythmes biologiques auxquels est soumis l'organisme, tend à montrer, qu'indépendamment de régulations sinusoïdales consécutives à un stimulus spécifique, l'organisme varie de manière cyclique (Winget et coll., 1985 ; Atkinson & Reilley, 1996 ; Teo et coll., 2011). Ces variations sont le plus souvent non linéaires, relativement prévisibles (p. ex., cycle ovarien), de périodes variables (Goldbeter A., 2002), d'amplitudes différentes et peuvent dépendre de l'environnement (Atkinson et coll., 2005), par exemple, de synchroniseurs externes comme la durée du jour et de la nuit, les heures de repas. Ces rythmes semblent permettre à l'organisme de mieux s'adapter aux rythmes environnementaux et se retrouvent étonnamment dans le vocabulaire de l'entraîneur qui planifie son entraînement, en termes de microcycles, mésocycles ou macrocycles (Werchoschanski J.V., 1985⁵⁴). Comme le cosinor est une méthodologie utile pour caractériser un rythme biologique (Cornelissen G., 2014), notre modélisation pourrait être utile aux entraîneurs qui

⁵³ Page 66-68

⁵⁴ Page 135

s'intéressent aux variations temporelles de la capacité de performance.

3.1.2- Mouvement harmonique simple amorti et modélisation des oscillations des effets de la charge

Nous postulons que la capacité de performance quotidienne (CPQ) de chaque journée d'entraînement peut être modélisée par une onde dont l'amplitude, après avoir atteint un minimum puis un maximum, diminue graduellement pour tendre à retourner à son niveau initial durant les jours qui suivent. Nous considérons la CPQ comme étant l'inverse de la CE. Si la CE augmente, la CPQ baisse. Inversement si la CE baisse ou cesse, la CPQ augmente ou se stabilise (Mujika & Padilla, 2000a et 2000b ; Avalos et coll., 2003). Il semble donc nécessaire d'étudier les variations du niveau de CPQ dans le cadre de processus non linéaires et non monotones sur le long terme.

Nous postulons donc que la variation de CPQ d'une séance peut être schématisée par l'équation du mouvement harmonique simple amorti, qui est la solution à l'équation différentielle de l'oscillateur harmonique simple auquel on ajoute une résistance de type exponentiel. Elle est représentée mathématiquement comme :

$$CPQ_{(t)} = -A \sin(\omega t + \phi) e^{\frac{-t}{\theta}} \quad (\text{Équation 53})$$

Où :

- CPQ (t) est la position selon l'axe y,
- A est l'amplitude, c.-à-d. la CE exprimée en unité arbitraire (u.a.),
- ω représente la vitesse à laquelle une oscillation complète peut être effectuée (valeur par défaut : $2\pi/T$ où T est la période qui représente le temps requis pour effectuer une oscillation complète, exprimée en jours),
- t est le temps écoulé dans la propagation de l'onde, exprimé en nombre de jours depuis le début du cycle d'entraînement (une valeur de t égale à 0 étant attribuée au premier jour du cycle).
- ϕ est la constante de phase. Au jour d'entraînement, sa valeur par défaut étant π (condition initiale).
- θ est le paramètre d'amortissement (en unité arbitraire)

Par reformulation :

$$CPQ_{(t)} = -CE \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \pi\right) e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (\text{Équation 54})$$

Pour une amplitude de la CE de 500 u.a., un paramètre d'amortissement θ de 6 u.a. et une période T de 11 jours, nous obtenons une sinusoïde de valeur maximale 500 u.a., de valeur minimale -500 u.a. qui se reproduit à l'identique tous les 11 jours, et une exponentielle décroissante de valeur maximale 1 u.a., de valeur 0,15 u.a. au 11e jour et qui tend vers une valeur minimale de 0 u.a. (figure 11).

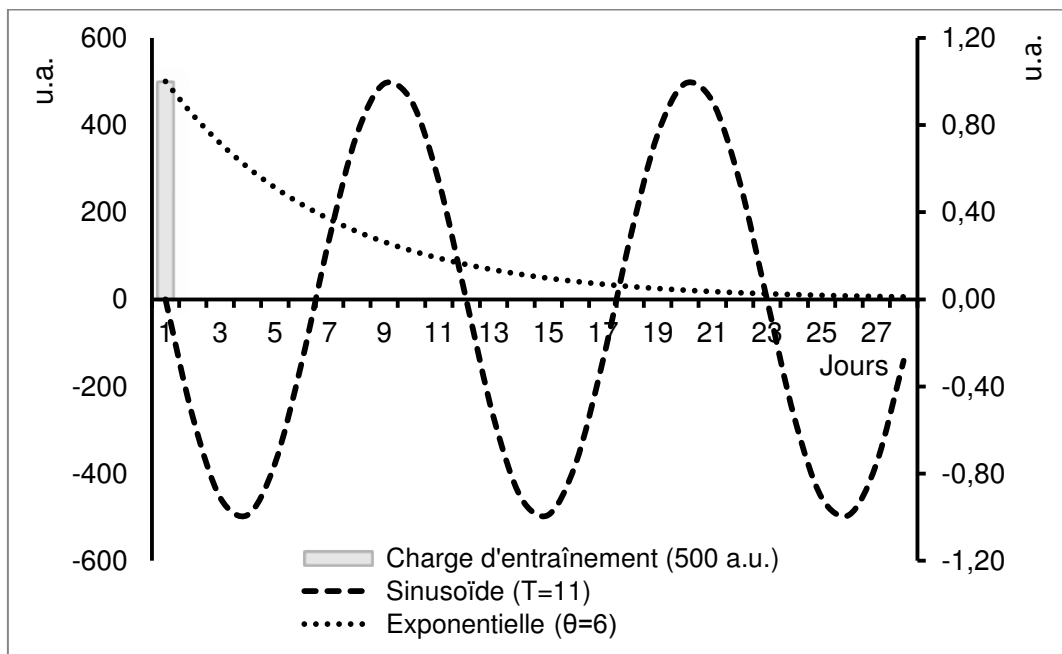


Figure 11 : Capacité de Performance Quotidienne (CPQ) : charge d'entraînement de 500 u.a. sur une période de 11 jours. La durée est exprimée sur l'axe horizontal en jours. La sinusoïde varie de -500 à 500 u.a. (axe primaire) et l'exponentielle décroît (amortissement θ de 6 u.a.) de 1 à 0,15 u.a. (axe secondaire).

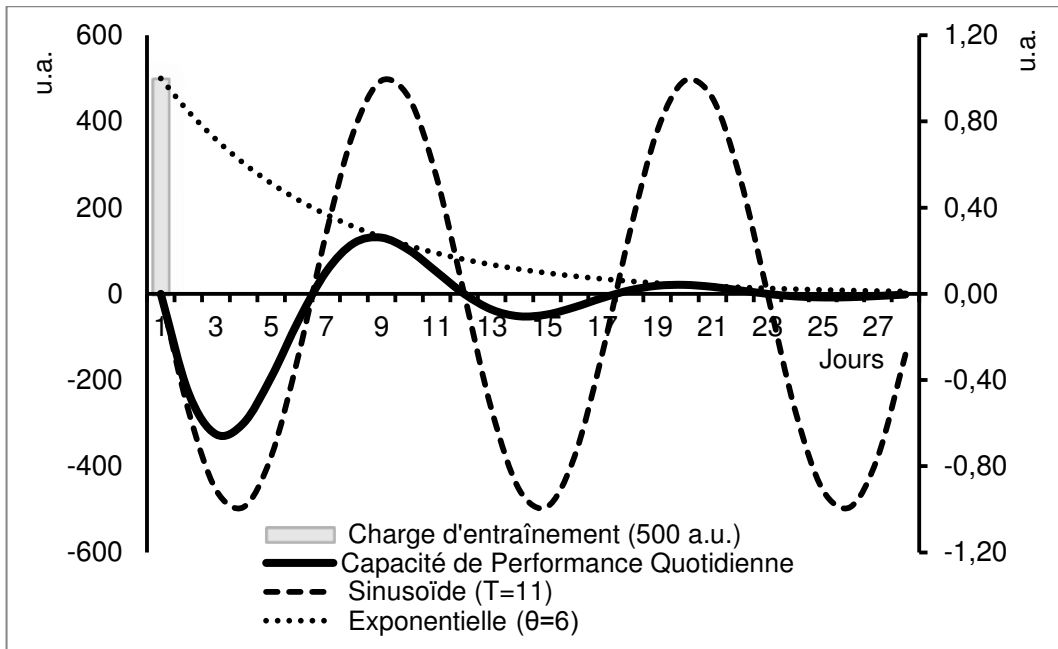


Figure 12 : Capacité de Performance Quotidienne (CPQ) pour une charge d'entraînement de 500 u.a. sur une période de 11 jours. La valeur maximale de CPQ est de valeur maximale 130 u.a. au 9e jour, de valeur minimale -325 u.a. ; au 4e jour. La durée est exprimée sur l'axe horizontal en jours. La sinusoïde varie de -500 à 500 u.a. (axe primaire) et l'exponentielle décroît (amortissement θ de 6 u.a.) de 1 à 0,15 u.a. (axe secondaire).

La CPQ est alors le produit de la sinusoïde et de l'exponentielle (figure 12) de valeur minimale -325 u.a. au jour 4, de valeur maximale 130 u.a. au jour 9 et de la valeur moyenne -54 ± 165 u.a. pour la période 11 jours.

3.1.2.1- Effets cumulés des journées d'entraînement

La CPQ au jour t est la somme des CPQ des jours précédents au jour t , CPQ qui peuvent être positives ou négatives compte tenu de l'éloignement des journées d'entraînement à la dernière journée d'entraînement (figure 13, équation 55).

$$CPQ_{(t)} = \sum_{i=1}^{t-1} CPQ_{(t-1,i)} \quad (\text{Équation 55})$$

Par exemple, sur une durée de neuf jours avec des CE constantes de 500 u.a., une journée de repos en J4, un paramétrage de 11 jours pour la période T et de 6 u.a. pour l'amortissement θ , les valeurs sont :

	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
CE Quo.	500	500	500	0	500	500	500	500	500
CPQ cumulée	0	-229	-555	-855	-819	-784	-758	-747	-749
Effet à J + 1	-228	-228	-228	0	-228	-228	-228	-228	-228
J + 2	-325	-325	-325	0	-325	-325	-325	-325	-325
J + 3	-300	-300	-300	0	-300	-300	-300	-300	-300
J + 4	-194	-194	-194	0	-194	-194	-194	-194	-194
J + 5	-61	-61	-61	0	-61	-61	-61	-61	-61
J + 6	51	51	51	0	51	51	51	51	51
J + 7	117	117	117	0	117	117	117	117	117
J + 8	130	130	130	0	130	130	130	130	130
J + 9	101	101	101	0	101	101	101	101	101

Tableau 11 : Capacité de performance quotidienne cumulée d'une période de neuf jours (trois jours de 500 u.a., suivi d'un jour de repos et de cinq jours de 500 u.a.).

La CPQ au 5^e jour (-819 u.a.) est la somme des CPQ différées des jours précédents (c.-à-d., $-819 = -194 (J + 4 \text{ de } J1) + -300 (J + 3 \text{ de } J2) + -325 (J + 2 \text{ de } J3) + 0 (J + 1 \text{ de } J4)$) (valeurs surlignées).

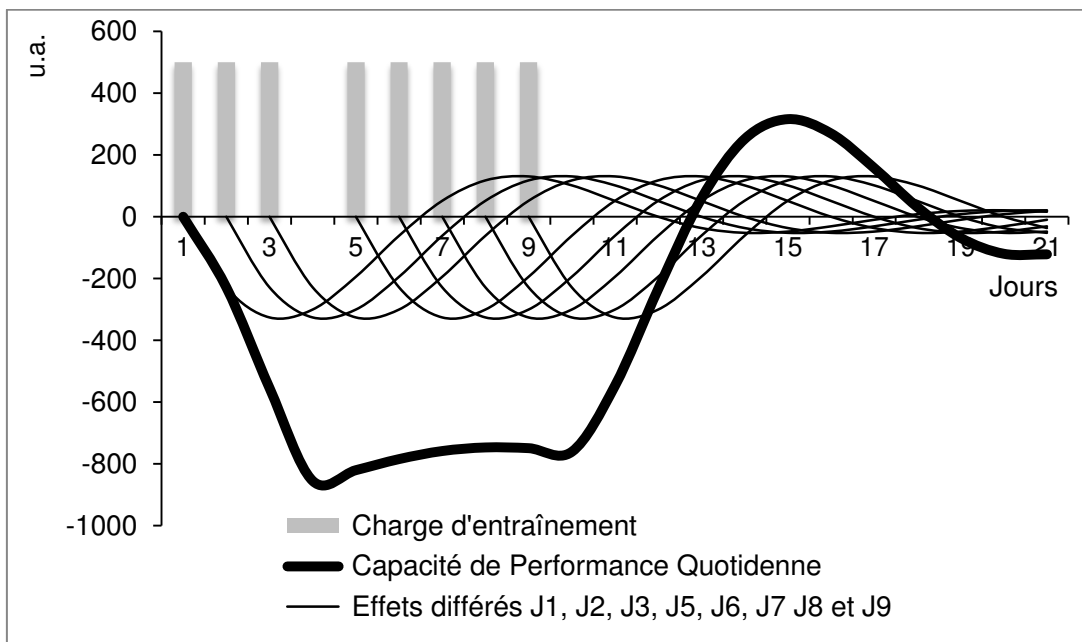


Figure 13 : Capacité de performance quotidienne cumulée pour une période de trois jours d'entraînement de 500 u.a., suivi d'une journée de repos et de cinq jours d'entraînement de 500 u.a. La valeur minimale est de -855 u.a. le 4^e jour et la valeur maximale de 316 u.a. au 15^e jour soit 6 jours après le dernier entraînement.

3.1.2.2- Effets actuels et différés d'une journée d'entraînement

Il est donc indispensable de définir pour chaque sportif les deux variables que sont l'amortissement (θ), et la période (T). Initialement, elles peuvent être prédéfinies sur les valeurs par défaut 5 u.a. et 11 jours, qui sont des valeurs moyennes empiriques qui restent proches respectivement des valeurs minimales (Busso et coll., 1991, 1994) et des valeurs maximales de τ_2 (Morton et coll., 1990, Busso et coll., 1994, Mujika et coll., 1996) rencontrées dans la littérature scientifique (pour l'amortissement (θ) et la période (T), respectivement). Mais également des valeurs d'ATL et de CTL du TSB de Coggan A. (2003)

3.1.2.2.1- Période, T

La période représente le temps requis pour effectuer une oscillation complète et revenir à la position initiale. Les hypothèses explicatives sous-jacentes peuvent tenir au niveau d'expertise du sportif qui influence les caractéristiques de ses capacités d'adaptation (Bompa & Haff, 2009⁵⁵ ; Issurin, V.B., 2008 et 2010). Mais aussi à la combinaison des caractéristiques dominantes de l'organisme sollicitées. Par exemple, les régulations des métabolismes énergétiques anaérobie et aérobie ont des périodes de variations différentes (12 à 24 heures et 48 à 72 heures respectivement) (Billat V., 2003⁵⁶).

Les figures 14, 15, et 16 illustrent les variations pour des valeurs T de 10, 15 et 20 jours. Dans le cas d'une pulsation unique (c.-à-d. un jour d'entraînement, P. ex., 500 u.a.), nous pouvons observer, qu'à amortissement constant (6 u.a.), plus le paramètre T est petit, plus l'acrophase⁵⁷ est importante. C'est-à-dire plus la CPQ est importante.

⁵⁵ Page 253

⁵⁶ Page 41

⁵⁷ « L'acrophase (ou sommet ou pic ou zénith) correspond à l'emplacement de la valeur maximale de la variable dans l'échelle de temps ». Encyclopaedia Universalis

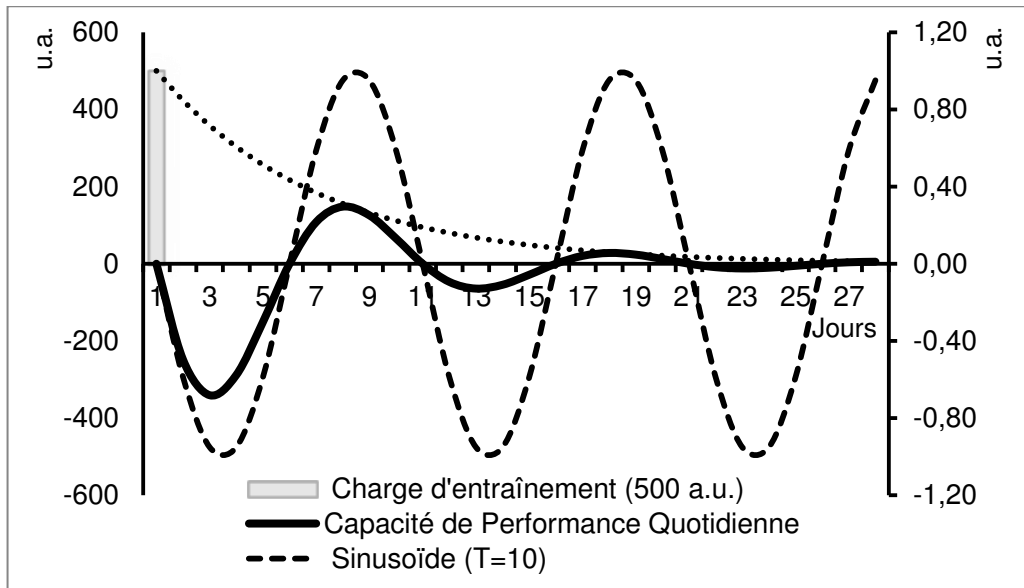


Figure 14 : Capacité de performance quotidienne différée avec pour paramètres : charge d'entraînement=500 u.a., période $T=10$ jours, amortissement $\theta=6$ u.a. La valeur maximale de la capacité de performance quotidienne est obtenue le 8e jour : 148 u.a.

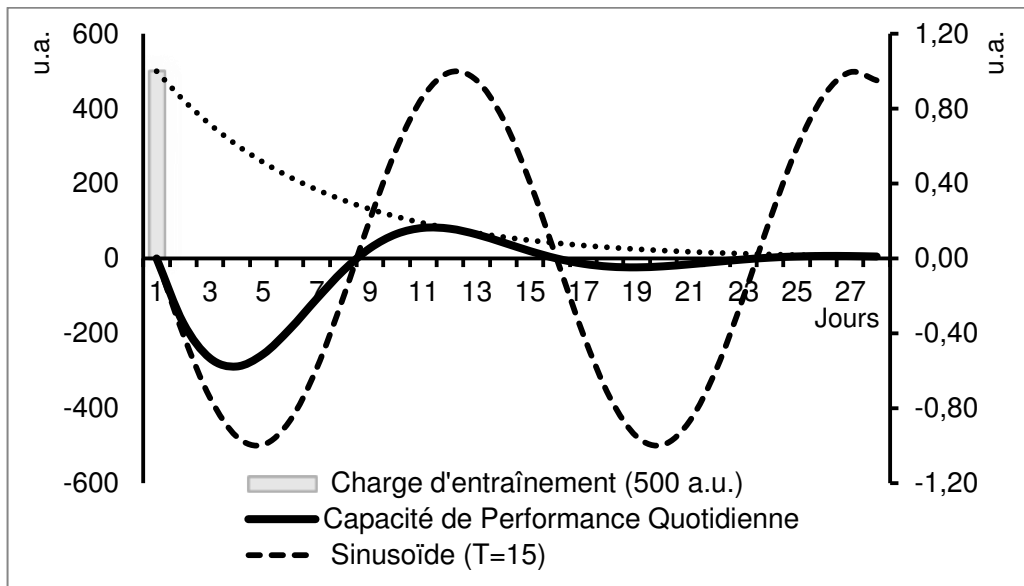


Figure 15 : Capacité de performance quotidienne différée avec pour paramètres : charge d'entraînement=500 u.a., période $T=15$ jours, amortissement $\theta=6$ u.a. La valeur maximale de la capacité de performance quotidienne est obtenue le 10e jour : 81 u.a.

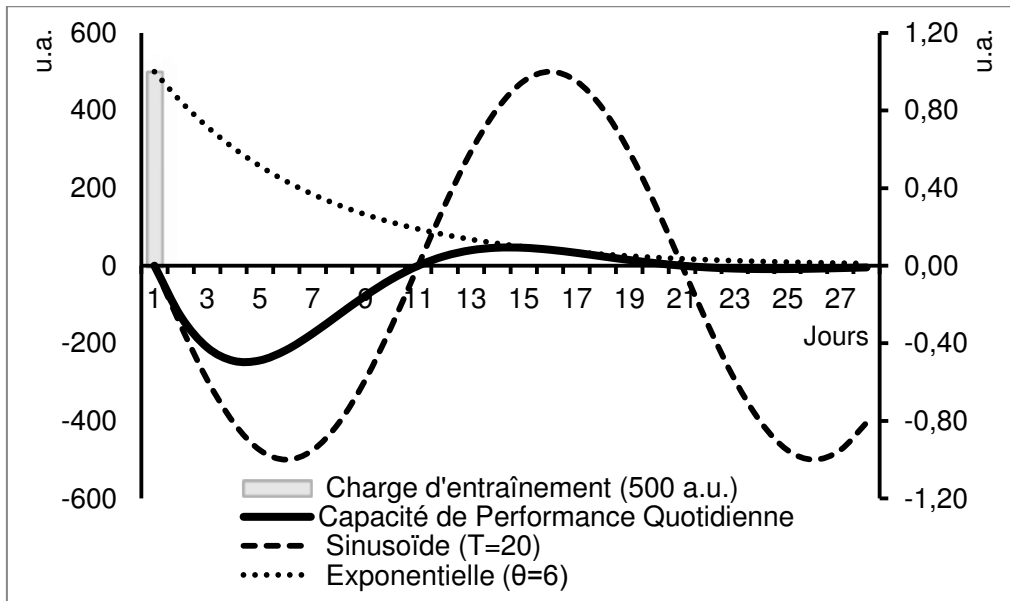


Figure 16 : Capacité de performance quotidienne différée avec pour paramètres : charge d'entraînement=500 u.a., période $T=20$ jours, amortissement $\theta=6$ u.a. La valeur maximale de la capacité de performance quotidienne est obtenue le 13^e jour : 46 u.a.

Pour des augmentations successives de T de 5 jours (soit +50 % et +33 % respectivement), les valeurs de CPQ diminuent de 67 u.a. (-45 %) et de 103 u.a. (-69 %) et sont différées dans le temps (8^e, 10^e et 13^e jours, respectivement).

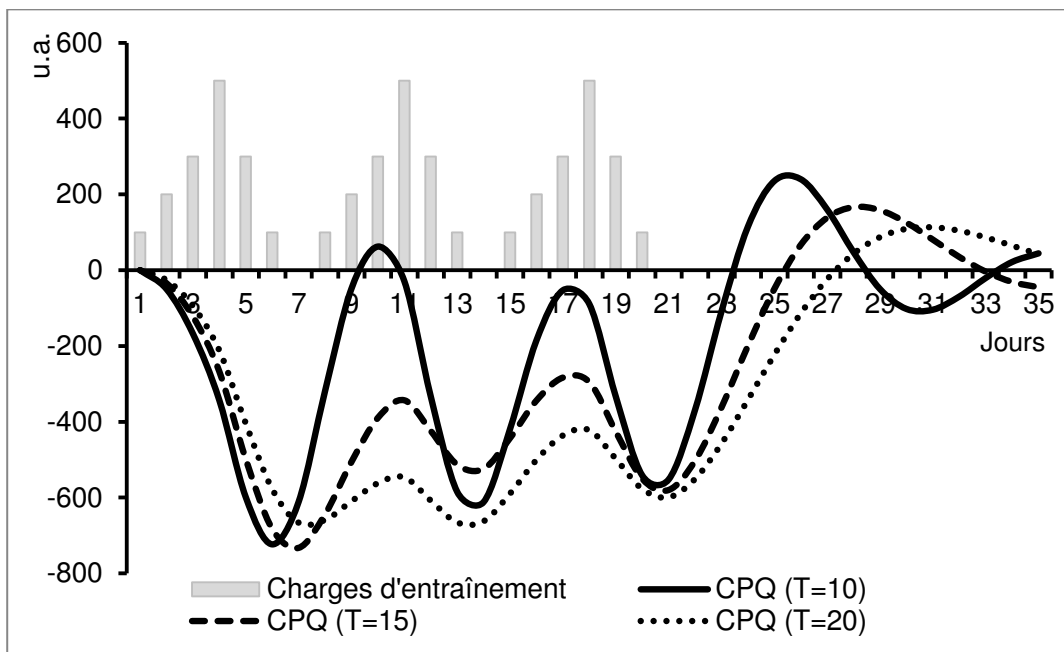


Figure 17 : Variations de la capacité de performance quotidienne (CPQ) pour des valeurs de T de 10, 15 et 20 jours pour trois microcycles identiques successifs (100, 200, 300, 500, 300, 100 et 0 u.a.). $\theta=6$ u.a.

Dans le cas d'une succession trois microcycles identiques (6 jours d'entraînement et un jour de repos), les variations de T pour des valeurs de 10, 15 et 20 jours conduisent à un aplatissement progressif de la CPQ (figure 17). Plus la valeur de T est importante moins les variations de CPQ sont importantes.

3.1.2.2.2- Amortissement, θ

θ est le facteur d'amortissement qui va influencer sur l'amplitude de la variation. Les hypothèses sous-jacentes peuvent tenir au niveau d'expertise du sportif qui conduit à une réaction différente suite à une CE donnée pour des niveaux d'expertise différents (Avalos et coll., 2003). Un sportif expert aura une réaction de régulation moins importante qu'un sportif débutant (Gastin et coll., 2013).

Les explications pourraient tenir aux variations des marqueurs biologiques avec l'âge, notamment du taux sanguin de testostérone (Khairullah et coll., 2014). Leifke et coll. (2000) montrent que la sécrétion maximale de testostérone se situe en moyenne à l'approche de la trentième année chez l'homme et baisse ensuite progressivement. La sécrétion d'hormone de croissance diminue également approximativement de 14 % par décennie après l'âge de vingt ans tandis que celle de l'IGF-1⁵⁸ diminue de 50 % entre vingt et soixante-dix ans. Compte tenu de son rôle anabolique musculaire et osseux, la réduction de sécrétions d'hormone de croissance pourrait expliquer une partie de l'augmentation de la masse grasse aux dépens de la masse maigre.

Préfaut & Masse-Biron (1989) rapportent également un abaissement de la consommation maximale d'oxygène de 10 % par décennie. Ils notent que tout arrêt de l'activité physique entraîne un nivellement de la consommation maximale d'oxygène vers le bas, par contre la reprise de l'activité physique l'améliore. Sa chute en fonction de l'âge semble donc due à deux facteurs essentiels, le vieillissement proprement dit et la diminution de l'activité physique.

Les figures 18, 19 et 20 illustrent les variations de CPQ pour des valeurs de θ de 5, 10 et 15 u.a. Dans le cas d'une pulsation unique (c.-à-d. un jour d'entraînement, p. ex., 500 u.a.), nous pouvons observer qu'à période T constante (p. ex., 10 jours), plus le paramètre

⁵⁸ IGF-1 : Insulin-like Growth Factor-1, hormone sécrétée par le foie qui influence le métabolisme cellulaire (croissance de tous les tissus)

d'amortissement θ est grand, plus la CPQ est importante.

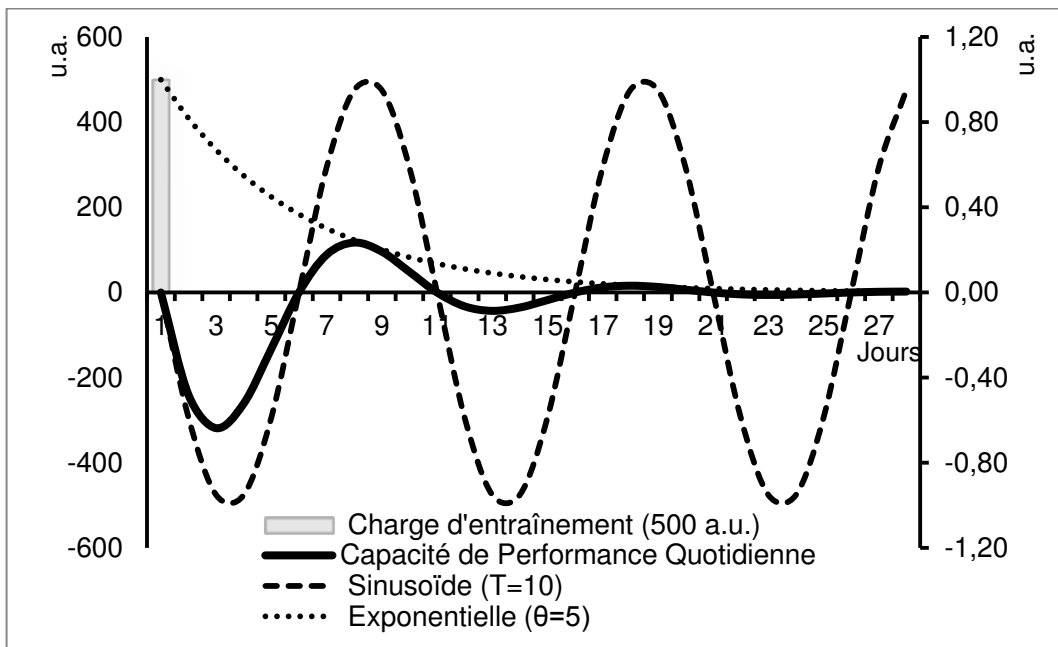


Figure 18 : Capacité de performance quotidienne différée avec pour paramètres : charge d'entraînement=500 u.a., période $T=10$ jours, amortissement $\theta=5$ u.a. La valeur maximale de la capacité de performance quotidienne est obtenue le 8e jour : 117 u.a.

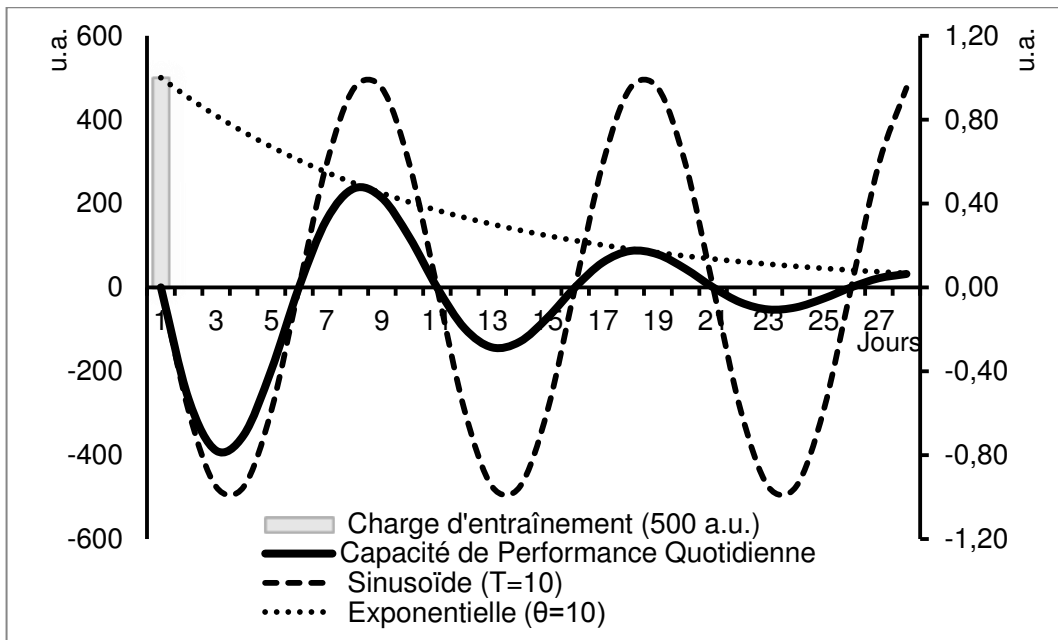


Figure 19 : Capacité de performance quotidienne différée avec pour paramètres : charge d'entraînement=500 u.a., période $T=10$ jours, amortissement $\theta=10$ u.a. La valeur maximale de la capacité de performance quotidienne est obtenue le 8e jour : 236 u.a.

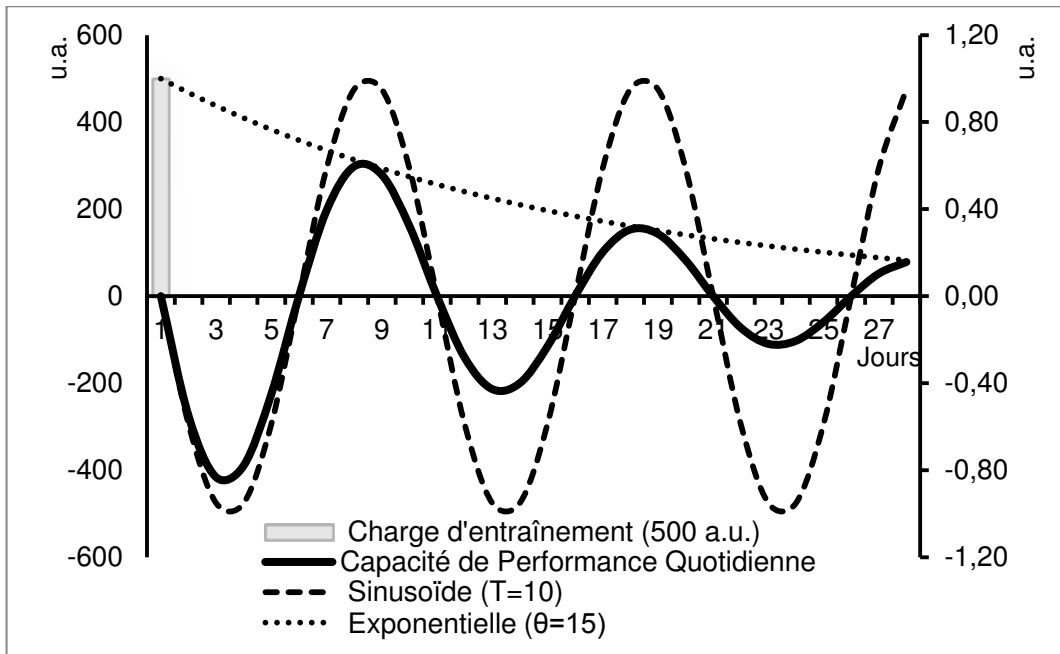


Figure 20 : Capacité de performance quotidienne différée avec pour paramètres : charge d'entraînement=500 u.a., période $T=10$ jours, amortissement $\theta=15$ u.a. La valeur maximale de la capacité de performance quotidienne est obtenue le 8e jour : 298 u.a.

Pour des augmentations successives de θ de 5 u.a. (soit +50 % et +33 % respectivement), les valeurs maximales de CPQ atteintes au 8e jour augmentent de 119 u.a. (102 %) et de 181 u.a. (155 %).

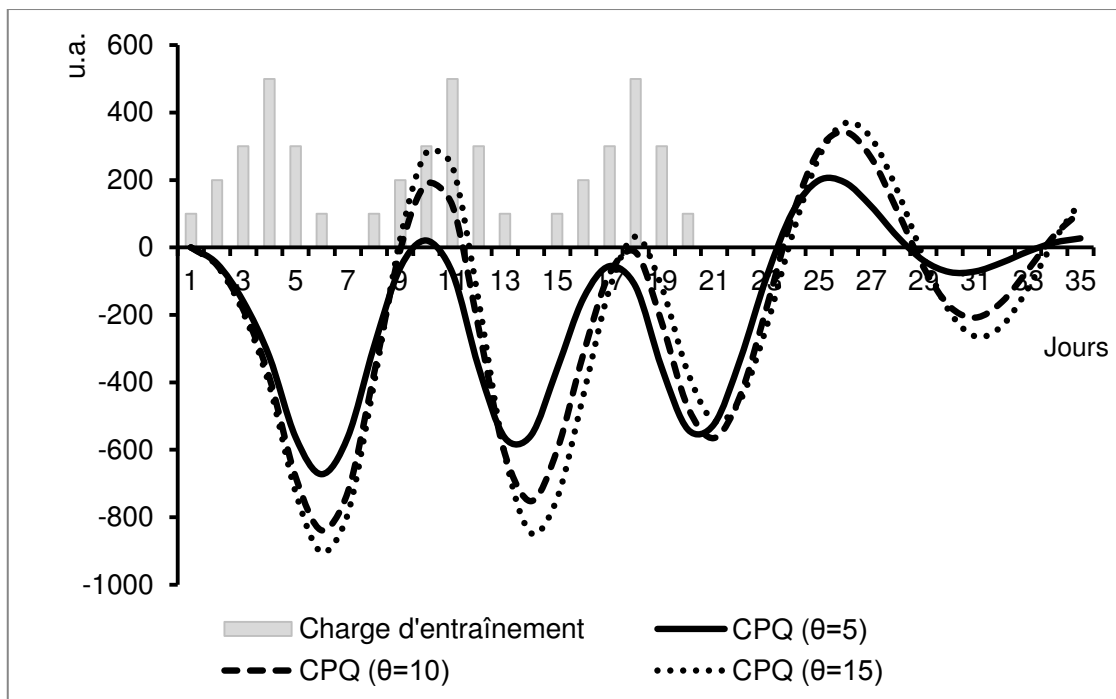


Figure 21 : Variations de la capacité de performance quotidienne (CPQ) pour des valeurs de θ de 5, 10 et 15 u. a. pour trois microcycles identiques successifs (100, 200, 300, 500, 300, 100 et 0 u.a.). $T=10$ jours.

Dans le cas d'une succession trois microcycles identiques (6 jours d'entraînement et un jour de repos), les variations de θ pour des valeurs de 5, 10 et 15 u.a. conduisent à une amplitude plus importante de la CPQ (figure 21). Plus la valeur de θ est importante plus les variations de CPQ sont importantes.

3.1.2.3- Effet de l'organisation des charges

3.1.2.3.1- Charge vs Décharge

Pour une période T et un amortissement θ similaires, le mode de distribution des CE quotidiennes à l'intérieur d'un microcycle influence l'amplitude et les variations de CPQ. La figure 22 représente un exemple de deux organisations d'une CE de 3600 u.a. par microcycle sur une durée de trois semaines. Une performance est réalisée à la fin de chaque semaine (6e, 13e et 20e jours). Les organisations de la CE sont inversées les trois premiers jours du microcycle.

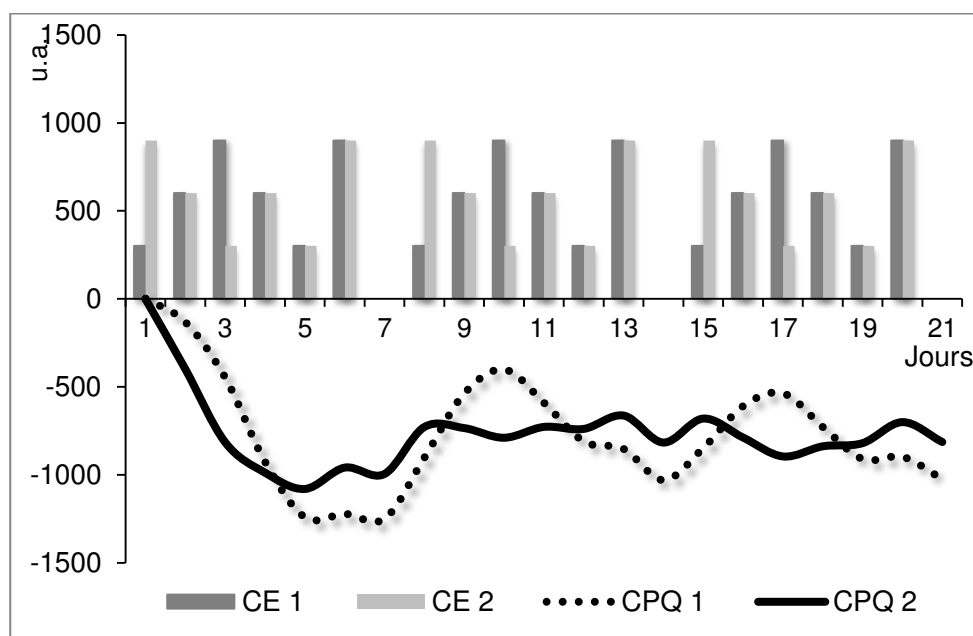


Figure 22 : Effets de l'organisation d'une même charge d'entraînement (CE) sur la variation de capacité de performance (CPQ) pour une période de trois semaines. Les CE sont inversées en début de semaine (lundi au mercredi) et identiques en fin de semaine (jeudi au dimanche.). J6, J13 et J20 : matchs.

La CE est progressivement augmentée du lundi au mercredi (c.-à-d., 300, 600 et 900 u.a.) dans un premier cas et progressivement diminuée (c.-à-d., 900, 600 et 300 u.a.)

dans un deuxième cas. Les trois jours suivants sont identiques (600 u.a. le jeudi, 300 u.a. le vendredi et 900 u.a. le samedi jour de la compétition). La semaine se termine par un jour de repos le dimanche.

Selon notre modélisation, nous pouvons constater que la CPQ 2 serait toujours supérieure de 22 % à la CPQ 1 le jour des compétitions. Toutefois, ce constat théorique nécessite d'être vérifié in situ. Nous pouvons noter que ces écarts ne peuvent être calculés avec la méthode de Foster et coll. (1995) car tous les calculs sont hebdomadaires. Le profil hebdomadaire de la CE ne peut donc pas avoir d'impact sur le niveau de performance avec la méthode de Foster et coll. (1995).

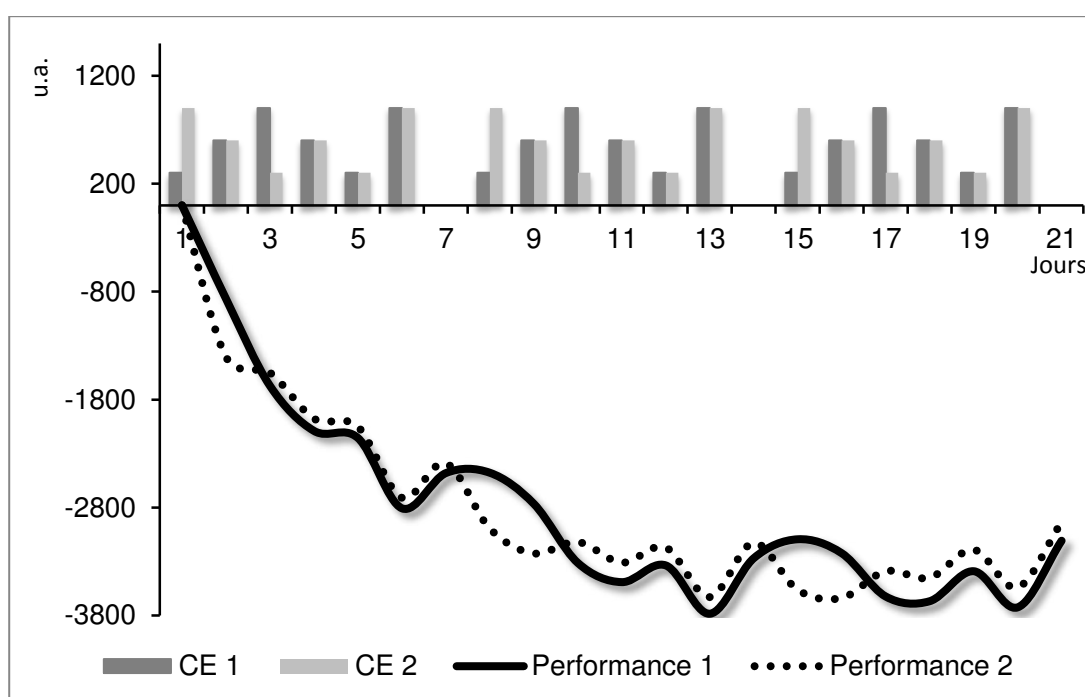


Figure 23 : Effets de l'organisation d'une même charge d'entraînement (CE) sur la variation de performance calculée avec le modèle de Banister et coll. (1975) pour une période de trois semaines. Les CE sont inversées en début de semaine (lundi au mercredi) et identiques en fin de semaine (jeudi au dimanche). J6, J13 et J20 : matchs.

Implémenté dans le modèle de Banister et coll. (1975), l'écart entre la distribution de la CE 1, qui consiste en une augmentation progressive en début de semaine, et la distribution de la CE 2, qui est une diminution progressive en début de semaine, serait par contre relativement faible (4 %) pour chaque journée de compétition (figure 23).

En comparant deux répartitions hebdomadaires des CE (CE décroissantes le lundi et le mardi) et CE croissantes (le lundi et le mardi), l'écart théorique de CPQ le jour du match serait de $8,1\% \pm 0,4\%$ en faveur de la distribution croissante (figure 24). La

variation de la CE de la fin de semaine reste pourtant identique (de mercredi à dimanche).

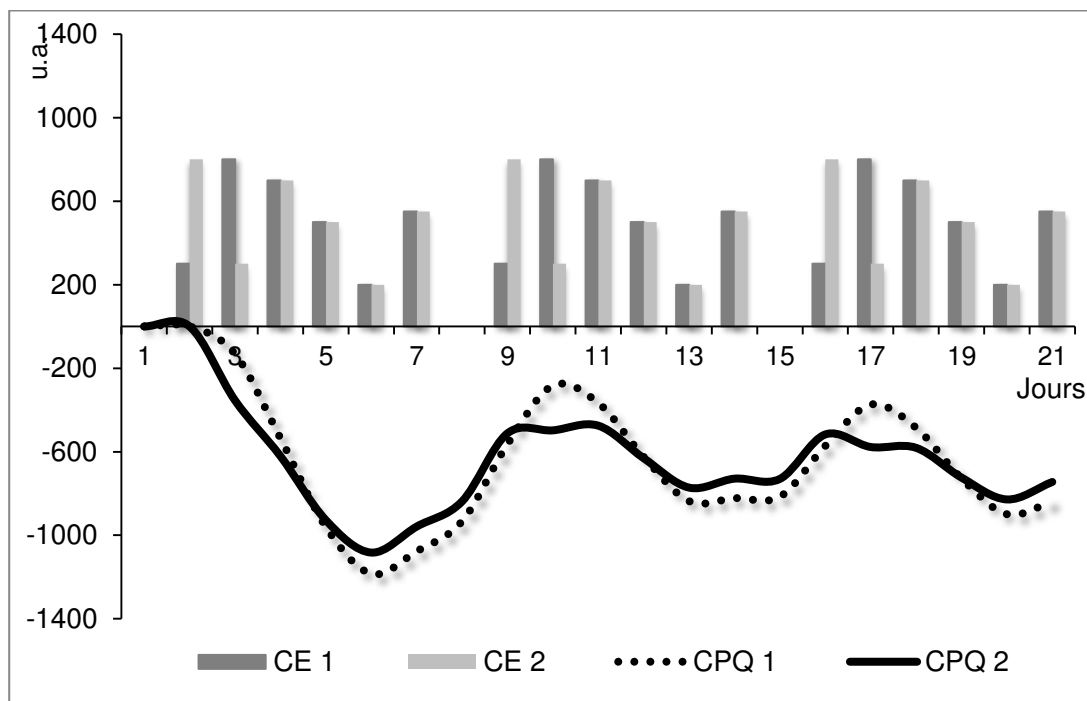


Figure 24 : Effets de l'organisation d'une même charge d'entraînement (CE) sur la variation de capacité de performance (CPQ) pour une période de trois semaines. Les CE sont inversées en début de semaine (lundi et mardi) et identiques en fin de semaine (mercredi à dimanche). J7, J14 et J21 : matchs.

3.1.2.3.2- Placement des jours de repos

Le positionnement des jours de repos semble avoir une grande influence sur la variation de CPQ. La figure 25 décrit deux scénarios.

Dans le scénario CE 1, le sportif s'entraîne lundi, mardi et mercredi avec une compétition le samedi. Jeudi, vendredi et dimanche sont des jours de repos.

Dans le scénario CE 2, le sportif s'entraîne mardi, mercredi et jeudi avec une compétition le samedi. Lundi, vendredi et dimanche sont des jours de repos. La CPQ est 455, 276 et 306 u.a. inférieure les jours de compétition dans le scénario CE 2.

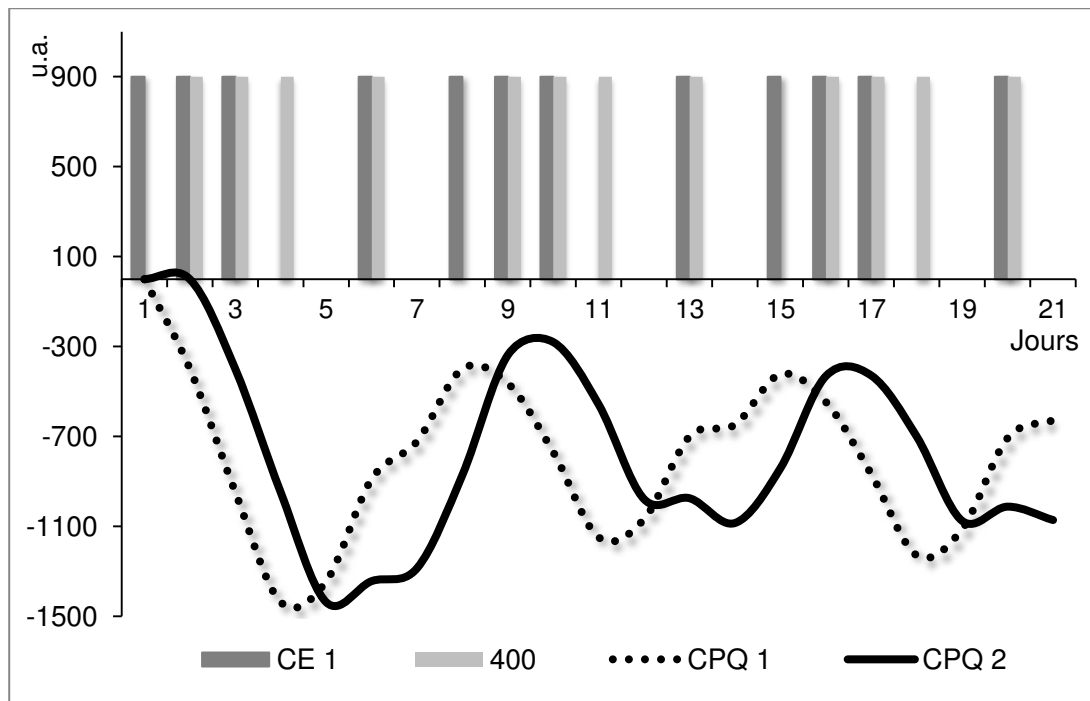


Figure 25 : Effets du positionnement hebdomadaire des jours de repos sur la variation de capacité de performance (CPQ) pour une période de trois semaines. Les CE hebdomadaires sont 3600 u.a. Les CE sont de 900 u.a. lundi, mardi, mercredi et samedi (CE 1) et mardi, mercredi, jeudi et samedi (CE 2). Les autres jours sont des jours de repos.

3.1.2.3.3- Décharge linéaire vs décharge exponentielle

La comparaison d'une baisse linéaire de la CE avec une baisse exponentielle (figure 26) met en évidence une différence de CPQ en faveur de la baisse de type exponentiel.

Par comparaison avec la baisse linéaire, la CE totale de la baisse exponentielle est moins importante de 22,8 % (833 vs 643 u.a.). Cependant l'écart de CPQ totale est de 25,2 % (-1218 u.a. vs -911 u.a.) (tableau 12). Une baisse exponentielle semble donc produire une meilleure CPQ (2,4 %). Cela est conforme avec la littérature qui mentionne des variations de -2,28 % (Neary et coll., 2005) à 8,91 % (Halson et coll., 2002).

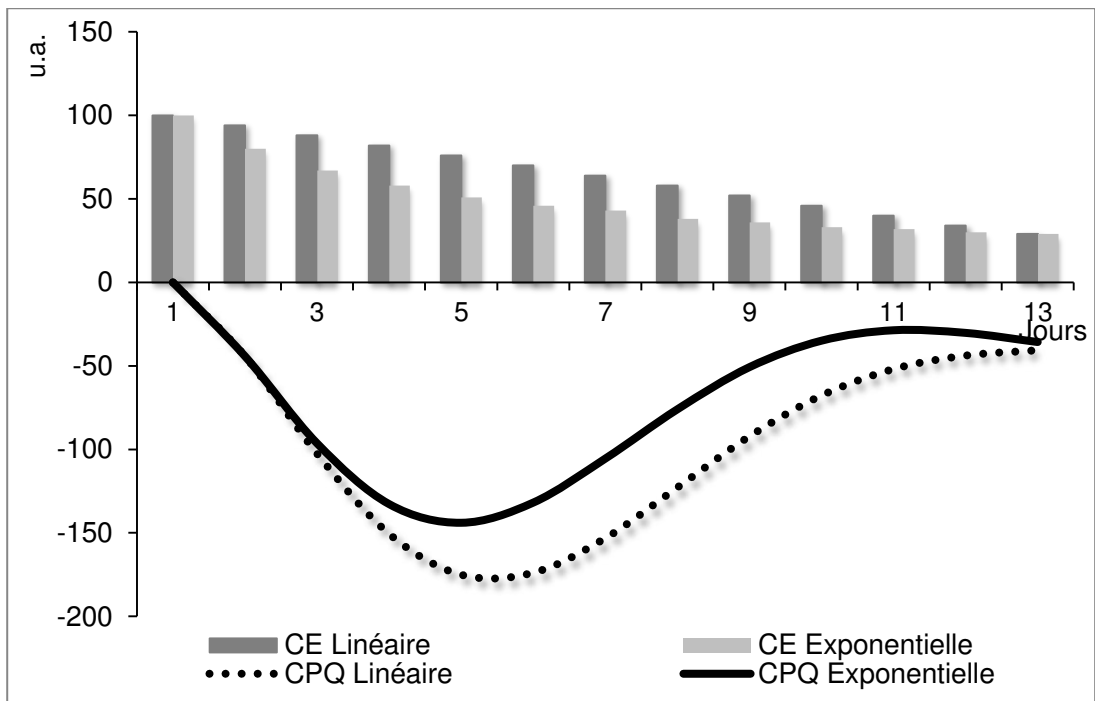


Figure 26 : Effets de deux types de baisse de la CE sur la variation de capacité de performance (CPQ). La baisse exponentielle de la CE provoque une amélioration de 2,4 % supérieure à celle de la baisse linéaire.

La valeur maximale de CPQ n'est par contre pas obtenue le même jour. Le 11^e jour pour la décharge exponentielle, et le 13^e jour pour la décharge linéaire.

CE Linéaire	CE Exponentielle	CPQ Linéaire	CPQ Exponentielle
100	100	0	0
94	80	-44	-44
88	67	-103	-96
82	58	-151	-133
76	51	-175	-144
70	46	-174	-132
64	43	-153	-106
58	38	-123	-76
52	36	-92	-51
46	33	-68	-35
40	32	-52	-29
34	30	-44	-30
29	29	-41	-36
833	643	-1218	-911
	22,8 %		25,2 %

Tableau 12 : Baisse de la CE de type linéaire et exponentielle en u.a. Conséquence sur la CPQ. L'écart de performance est de 2,4 % à la faveur de la baisse exponentielle de la CE.

Même si les valeurs correspondent à celles de la littérature sur l'affûtage (Bosquet et coll., 2007), il convient toutefois d'être prudent sur les conclusions car les CE ne sont pas identiques ce qui rend les comparaisons difficiles.

3.2- MATERIEL ET METHODE

Pour l'entraîneur, l'informatique ergonomique désigne les moyens, les outils et les méthodes qui permettent de collecter, modéliser et restituer les données afin de lui offrir une aide à la décision, et de lui permettre d'avoir une vue d'ensemble de l'activité du sportif.

Les nombreuses données collectées (performances, tests, répétitions, distances...) sont traditionnellement inscrites dans un cahier ou dans un tableur, mais ne sont jamais exploitées et ne lui permettent pas de répondre à deux questions majeures : que s'est-il passé ? Que va-t-il se passer ?

Le compte rendu est alors l'application la plus intéressante pour l'entraîneur, car il permet de sélectionner des données relatives à une certaine période, de trier, regrouper ou répartir ces données selon des critères, de réaliser des calculs (totaux, moyennes, écarts, taux, comparatif d'une période à l'autre), de présenter les résultats d'une manière synthétique ou détaillée, le plus souvent graphique selon ses attentes.

« L'aide à la décision est l'activité de celui qui, en prenant appui sur des modèles, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et à normalement prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part. » (Roy B. 1985⁵⁹)

L'aide à la décision contribue donc à construire et à faire partager des convictions. Elle ne relève donc que d'une façon très partielle d'une recherche de la vérité. Elle permet d'apporter des réponses pertinentes aux problématiques diverses de l'entraîneur en mettant en œuvre plusieurs choix possibles, d'aider au diagnostic et, plus généralement, de faciliter la prise de décision.

⁵⁹ Page 15

3.2.1- Web-application "TrainingLoad Pro" © : présentation

Les produits les plus élaborés existants actuellement sur le marché (ProPlan⁶⁰, www.athletemonitoring.com⁶¹, www.spartanova.com⁶², www.trainingpeaks.com⁶³) utilisent soit la méthode de Foster C. (1998) soit la méthode de Coggan A. (2003) pour prédire le niveau d'aptitude, et ne permettent pas le suivi de nombreux marqueurs. Nous avons donc créé une application répondant aux exigences de l'informatique décisionnelle, mais aussi aux exigences et contraintes du monde sportif professionnel, notamment des sports collectifs.

Ce projet d'outil d'aide à la décision représente une première tentative de modélisation de la CPQ et de la gestion des entraînements associés. Le but principal du logiciel est d'assister les entraîneurs dans la gestion de la CE de sportifs professionnels. Il doit être le plus ergonomique possible, mais pouvant répondre à terme à toutes les demandes d'autres sportifs ou entraîneurs.

L'application doit permettre de gérer des activités multiples comme :

- saisir les données à partir de multiples terminaux,
- stocker les données de manière sécurisée (en ligne et hors ligne),
- traiter les données suivant de multiples critères de tri,
- modéliser la capacité de performance
- représenter graphiquement les données avec la possibilité de les personnaliser,
- exporter les données sous différents formats (graphique, tabulaire) pour être exploité par d'autres logiciels (statistiques)
- effectuer des opérations d'administration et de maintenance (paramétrage du profil du sportif, modifications des séances, sauvegarder et restaurer la base de données et la configuration personnalisée).

L'application est divisée en deux modules : saisie et traitement des données. Nous avons donc deux types d'utilisateurs : le premier type (le sportif) a la possibilité d'accéder

⁶⁰ http://www.cardisport.com/scripts/prepa/prepa_02.php#plan

⁶¹ <http://www.athletemonitoring.com>

⁶² <http://www.spartanova.com/fr>

⁶³ <http://home.trainingpeaks.com>

aux formulaires pour saisir les données, le deuxième type (l'entraîneur) accède au module de traitement des données. Cet accès n'est pas exclusif, car le sportif peut y accéder.

3.2.2- Utilisation

La problématique de saisie de données est très fortement subordonnée à l'ergonomie des outils de saisie afin que ces dispositifs puissent être utilisés avec le maximum de confort, de sécurité et d'efficacité. Il ne semblait donc pas envisageable pour des raisons de confidentialité, de rapidité de saisie et de traitement postérieur des données d'utiliser un carnet individuel ou de demander à une tierce personne de retranscrire les perceptions des sportifs.

Pour permettre la saisie par le plus grand nombre, en tout temps et en tous lieux, nous avons développé un site web à accès sécurisé. Il est enregistré sous le nom de domaine www.trainingloadpro.com et existe en version française et en version anglaise, car l'effectif est cosmopolite. Le changement de langue s'effectue par un clic sur une icône située en haut et à gauche de l'écran.

Après s'être identifié, le sportif accède au formulaire de saisie. Pour des raisons de rapidité, il n'est pas envisageable d'utiliser le clavier, même virtuel, trop coûteux en temps et souvent problématique en termes d'erreurs de saisie. Nous avons opté pour la saisie tactile et développé le site avec le langage de développement JQuery Mobile, qui est le moyen le plus rapide pour construire des sites et des applications qui soient accessibles sur les appareils les plus vendus. Le framework⁶⁴ inclut un système de navigation Ajax qui apporte un ensemble de widgets⁶⁵ d'interface utilisateur tactile conviviale indispensable, les pages, les boîtes de dialogues, les barres d'outils, les listes déroulantes, les boutons avec les icônes, les éléments de formulaire et les curseurs. Il a pour avantage important qu'aucun navigateur ou périphérique n'est laissé pour compte et peut donc être utilisé avec les systèmes d'exploitation les plus couramment rencontrés que sont Windows, OS X (Mac), IOS (iPhone, iPad) et Android (HTC).

Pour rendre ce support le plus compatible possible, toutes les pages dans JQuery Mobile sont construites sur une base HTML5. Les langages de scripts PHP et SQL via le

⁶⁴ Framework : ensemble de composants logiciels qui sert de base à tout ou partie d'un logiciel

⁶⁵ Widget: contraction des mots windows et gadget

logiciel open source⁶⁶ de gestion de bases de données MySQL nous ont permis de stocker les données dans une base en ligne, mais aussi de les envoyer par mail en pièce jointe après chaque saisie. Ces fichiers sont aussi stockés dans un répertoire sur le serveur, ce qui assure une triple sauvegarde des données. Les fichiers sont enregistrés au format XML, qui est un format de balisage générique extensible, car elle permet de définir différents espaces de noms. La syntaxe est reconnaissable par son usage des chevrons (<>) encadrant les balises.

Le langage CSS permet une mise en forme des composants graphiques à l'écran, qui s'adapte automatiquement à la diversité des résolutions d'écran et des navigateurs.

Certaines données font l'objet de graphiques consultables directement sur le site. Ces graphiques sont réalisés avec les classes JavaScript et les libraires Google Charts (licence MIT⁶⁷). Nous n'avons pas choisi la technologie Flash, car les appareils Apple ne les supportent pas et donc ne les affichent pas nativement.

3.2.2.1- Identification

Dans la phase initiale du projet, la saisie n'était réalisée que sur Smartphone non connecté au réseau. À la fin de la séance, l'entraîneur le connectait à son ordinateur pour transférer les données vers le logiciel dédié. Deux raisons expliquent ce choix : 1) le prix dissuasif des abonnements et des communications pour accéder à une liaison data ; 2) la couverture téléphonique des installations sportives. Elles n'étaient pas obligatoirement dans la zone d'un prestataire de téléphone mobile.

Nous avons donc opté initialement pour une utilisation non connectée. Mais la forte évolution du marché de la téléphonie mobile, ainsi que celle du déploiement du WiFi dans les installations sportives, nous a amenés à réviser notre stratégie, d'autant plus que des sportifs peuvent être sélectionnés en équipe nationale de différents pays. Saisir les données directement sur leurs propres smartphone⁶⁸, tablette ou ordinateur devenait la solution la plus efficace, d'autant plus qu'aujourd'hui les sportifs sont très équipés en périphériques

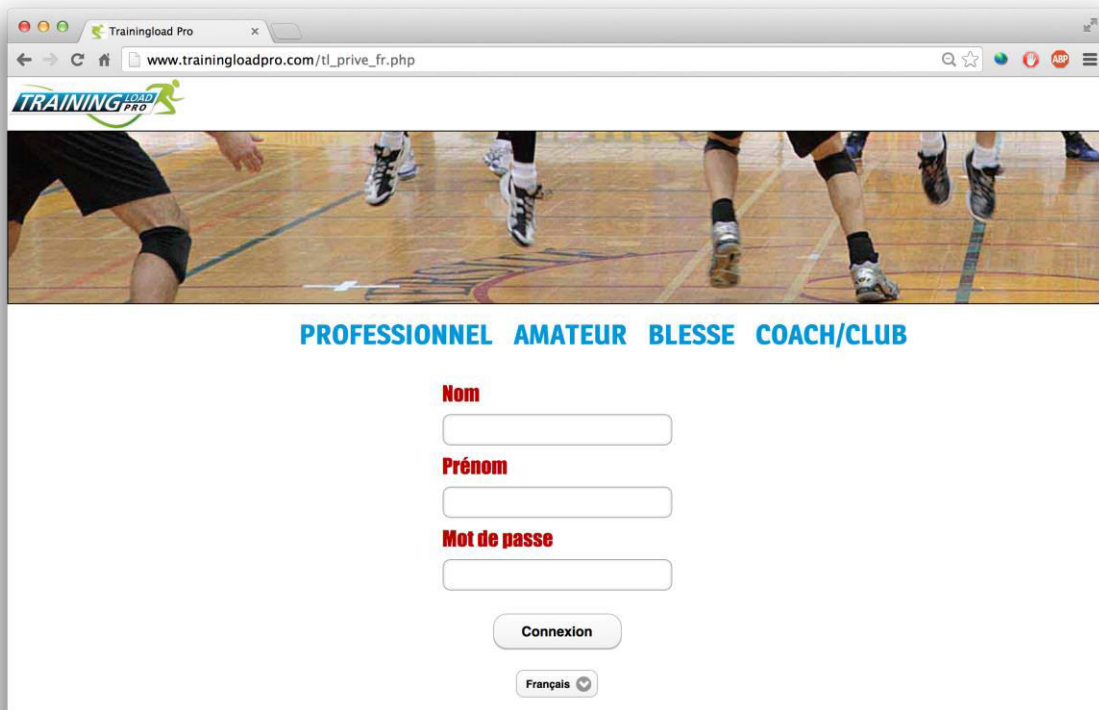
⁶⁶ Open source : licence qui respecte les possibilités de libre redistribution, d'accès au code source.

⁶⁷ Licence de logiciel libre et open source, non copyleft, permettant donc d'inclure des modifications sous d'autres licences, y compris non libres.

⁶⁸ Smartphone : téléphone mobile évolué disposant des fonctions d'un assistant numérique personnel, d'un appareil photo numérique et d'un ordinateur portable.

connectés en continu à un réseau de communication. Ce sont les raisons de la conception du site web et de la web-application.

À la fin de chaque séance, les sportifs saisissent leurs perceptions qui sont immédiatement stockées en base de données sur le serveur, transférées sous la forme de courriel avec un fichier attaché pour éviter toute perte dans l'éventualité d'une panne ou de la perte du Smartphone.



TRAINING LOAD PRO

PROFESSIONNEL AMATEUR BLESSE COACH/CLUB

Nom

Prénom

Mot de passe

Connexion

Français

Figure 27 : TrainingLoad Pro - Formulaire d'identification

L'identification nécessite d'inscrire ses nom, prénom et mot de passe (figure 27). Il est important de noter que dans le cas d'un périphérique à usage strictement personnel, la très grande majorité des navigateurs permettent de retenir ses informations par l'intermédiaire de sessions ou de cookies afin d'éviter de devoir s'identifier à chaque nouvelle connexion.

3.2.2.2- Formulaire

La première qualité d'un outil de saisie est d'être ergonomique, c'est-à-dire de pouvoir être utilisé quotidiennement pour tous les types de séances, que ce soit des séances de musculation, d'étirement, mais aussi de kinésithérapie. L'échelle visuelle analogique permet de mesurer la variation d'état d'un marqueur. Son intérêt majeur est de pouvoir normaliser les marqueurs, quelles que soient les séances d'entraînement. C'est un outil simple d'utilisation, réceptif aux variations du système qui se présente sous la forme d'une règle munie d'un curseur mobile. De par sa facilité d'utilisation et sa sensibilité, elle autorise la répétition des mesures. Ce type d'outil offre au sportif la possibilité de ne pas répondre selon des catégories figées.

The screenshot displays the TrainingLoad Pro web interface. At the top, there is a navigation bar with the logo 'TRAINING LOAD PRO' and the name 'MORIN STEPHANE'. Below this is a banner image showing the lower legs and feet of several runners on a wooden floor. The main content area is divided into two columns. The left column contains sections for 'Agenda' (with date and time selection), 'Santé' (with weight and health status questions), and an 'Enregistrer' button. The right column is titled 'Perceptions' and contains ten visual analog scales, each with a green smiley face on the left and a red frowny face on the right. The scales are: 'Conditions d'entraînement', 'Fatigue', 'Vitesse d'endormissement', 'Qualité du sommeil', 'Vigueur', 'Intensité moyenne de tous les efforts', 'Intensité de l'effort le plus difficile', 'Maîtrise technique/tactique', and 'Etat d'esprit'. Each scale has a horizontal bar with a small green circle at the start, indicating the initial cursor position.

Figure 28 : TrainingLoad Pro - Formulaire de saisie - Placements initiaux des curseurs

L'échelle visuelle analogique est aujourd'hui très répandue. Bijur et coll. (2001 et 2003) ont démontré sa bonne reproductibilité en médecine d'urgence. La variation moyenne entre deux mesures effectuées à 1 minute d'intervalle en dehors de tout traitement était de 2 à 9 mm et ce quel que soit le niveau d'intensité.

Les échelles visuelles analogiques sont dépourvues d'éléments ludiques et leurs extrémités sont identifiées par des icônes explicites neutres. Piacentini & Meeusen (2014) ont montré son utilité dans la prévention du surentraînement.

Par ailleurs, Ginies et coll. (2005) ont démontré la validité de l'échelle visuelle électronique par comparaison avec l'échelle visuelle analogique. L'évolution des technologies de la communication permet aujourd'hui d'implémenter ces échelles visuelles analogiques dans des applications spécifiques sur des objets communicants ou sur des sites internet, ce qui permet une saisie rapide dès la fin de l'entraînement. La taille limitée de l'écran peut néanmoins conduire à s'interroger sur la validité métrologique d'une EVA adaptée à ce type d'outil. Dans leur étude comparant trois méthodes (EVA de Huskisson E.C. (1974) sur papier, réglette avec curseur, EVA électronique avec un écran tactile Palm TM de 4,9 cm), Kempf et coll. (2001) ont montré que la douleur moyenne mesurée avec les trois appareils est très comparable (24 patients hospitalisés). Les différences entre les 3 appareils étaient très faibles et statistiquement non significatives. La corrélation entre l'EVA papier et l'EVA électronique était excellente ($R: 0,97$) très proche de celui observé entre l'EVA papier et la réglette ($R: 0,94$).

Le formulaire comporte trois zones d'informations (figure 28). La zone Agenda indique la date et l'heure actuelle ainsi que la date et heure de la dernière séance saisie. Le sportif saisit alors la date de la séance, l'heure de début réel de la séance ainsi que sa durée effective. Cette dernière donnée servira au calcul de la CE.

La deuxième zone contient les marqueurs subjectifs pour lesquels le sportif doit exprimer, à l'aide d'un curseur à déplacer sur une ligne, son niveau de perception. Deux icônes placées aux extrémités indiquent le sens de la relation, du plus faible au plus fort. La position du curseur est rendue plus lisible par l'apparition d'une zone de remplissage rouge (figure 28). Les échelles visuelles analogiques ne comportaient ni marques, ni valeurs numériques, ni commentaires verbaux pour éviter tous phénomènes de mémorisation. Deux émoticônes placées à chaque extrémité de l'échelle précisaient

l'orientation de l'échelle. Les échelles visuelles apparaissent toujours le même ordre, orientées horizontalement à l'écran. La valeur « Très, très bon ou facile » était placée en bas de l'écran, la valeur « Très, très mauvais ou difficile » était placée en haut de l'écran.

TRAININGLOAD PRO
MORIN STEPHANE

SAISIE GRAPHIQUES AGENDA TABLEAUX COACH

Agenda

Aujourd'hui : 20 Septembre 2014 à 14:16

Entraînement du

Jour Mois 2014

Heure de début

Heures Minutes

Durée

hh:mm

Santé

Votre poids

k g

Etes-vous malade ?

Non

Avez-vous des douleurs ?

Non

Enregistrer

Perceptions

Conditions d'entraînement (météo, température, état du terrain)

Fatigue (impression générale après la séance)

Vitesse d'endormissement (de la nuit dernière)

Qualité du sommeil (de la nuit dernière)

Vigueur (dynamisme, avant la séance ...)

Intensité moyenne de tous les efforts (de toute la séance)

Intensité de l'effort le plus difficile (de toute la séance)

Maîtrise technique/tactique (sensations)

Etat d'esprit (humeur, enthousiasme)

Figure 29 : TrainingLoad Pro - Formulaire de saisie - Exemple d'une saisie

La troisième zone concerne la santé. Le sportif peut préciser s'il est malade ou s'il ressent des douleurs. Il peut également inscrire les valeurs de sa dernière pesée.

3.2.2.2.1- Adaptation automatique à la résolution de l'écran

Afin d'éviter de développer autant de fois le site qu'il n'y a d'appareils et/ou de navigateurs, nous avons utilisé le langage CCS3 pour avoir un affichage sur trois, deux ou une colonnes suivant qu'il s'agisse d'un ordinateur, d'une tablette ou d'un Smartphone.

Partant de l'affichage sous la forme d'une colonne, il est possible d'ajouter l'icône du site web à l'écran d'accueil du Smartphone. Pour un iPhone, il faut appuyer sur le bouton Partager en bas de l'écran Safari lorsque l'on visite le site. L'utilisateur aura alors l'impression d'avoir une application et de ne plus être sur un site web. Il s'agit ici alors d'une web App⁶⁹.

3.2.2.2.2- Interface graphique

Si l'entraîneur doit programmer ses propres requêtes dans une console, il ne fait nul doute qu'aucun ou très peu d'entre eux n'utiliseraient le logiciel. Chaque commande est donc matérialisée sous forme d'objet à manipuler. Une action (un clic, un double-clic) sur ces objets déclenche un événement, c'est-à-dire une action à réaliser sur le contenu. Ce peut être une liste déroulante pour sélectionner un nom, un bouton pour ajouter une donnée, une fenêtre pour afficher un graphique, ou un menu pour accéder à d'autres possibilités.

L'intérêt premier de l'ergonomie des interfaces utilisateurs est d'établir une communication efficace entre le programme et l'utilisateur. L'ergonomie détermine ainsi l'acceptabilité de l'application par l'entraîneur, la facilité et l'efficacité d'utilisation et la facilité d'apprentissage. Faire une bonne interface ou une application ergonomique en faisant l'impasse sur la connaissance des futurs utilisateurs et sur leur manière de travailler est illusoire. Il a donc été nécessaire, par exemple, de trouver un compromis entre la densité d'informations affichées dans chaque fenêtre et le nombre de fenêtres. Une forte densité augmente le temps nécessaire pour repérer l'information, une trop grande dilution dans un trop grand nombre de fenêtres gêne dans la perception globale du logiciel.

En termes de navigation, nous avons privilégié autant que possible la règle informelle dite des « trois clics » communément admise en conception web. C'est un

⁶⁹ WebApp : Web Application, application manipulable grâce à un navigateur Web. Par opposition à une Native Application, qui peut fonctionner en mode déconnecté.

principe d'ergonomie selon lequel l'utilisateur, toujours plus impatient, doit pouvoir accéder à n'importe quelle commande en effectuant au plus trois clics de souris depuis l'écran principal. Parmi l'ensemble des guides de recommandations ergonomiques pour la conception et l'évaluation d'interfaces graphiques disponibles, nous avons retenu comme source primaire pour le logiciel celui du CNRS⁷⁰

⁷⁰ Guide de recommandations ergonomiques pour la conception et l'évaluation d'interfaces graphiques, CNRS, DSI

3.2.2.3- Santé

The screenshot shows a web browser window with the URL `www.trainingloadpro.com/tl_form_fr.php#Localisation01%Genou_droit:_devant`. The page title is **Santé**. The form includes the following sections:

- Votre poids**: Two dropdown menus for units, currently set to 'k' and 'g'.
- Etes-vous malade ?**: A radio button selection with 'Non' selected.
- Avez-vous des douleurs ?**: A radio button selection with 'Oui' selected.
- Douleur 1**: A text input field containing 'Douleur 1'.
- Localisation**: A text input field with the instruction '(cliquer sur l'image)'. Below it are two anatomical diagrams of a male figure. The left diagram shows a front view with a blue bandage on the right knee. The right diagram shows a back view.
- Douleur associée**: A horizontal slider with a green smiley face on the left and a red frowny face on the right. The slider is positioned towards the green end.
- Mécanisme d'apparition**: A radio button selection with 'Usure' selected.
- Douleur 2**, **Douleur 3**, and **Douleur 4**: Three empty text input fields, each with a plus sign on the left.

Figure 30 : TrainingLoad Pro - Description des douleurs

Un sportif peut saisir jusqu'à quatre douleurs. Pour chacune, il précise sa localisation en cliquant ou appuyant avec le doigt sur la zone concernée (figure 30). Il doit, en complément, mentionner le niveau de douleur perçue associé en déplaçant le curseur sur la ligne et préciser le mécanisme potentiel d'apparition (usure/accident).

Les données ayant un caractère personnel et pouvant porter sur la santé et parce qu'elles relèvent de l'intimité de la vie privée ont fait l'objet d'une déclaration à la CNIL (numéro d'enregistrement : em311526537).

3.2.2.4- Graphiques et tableaux

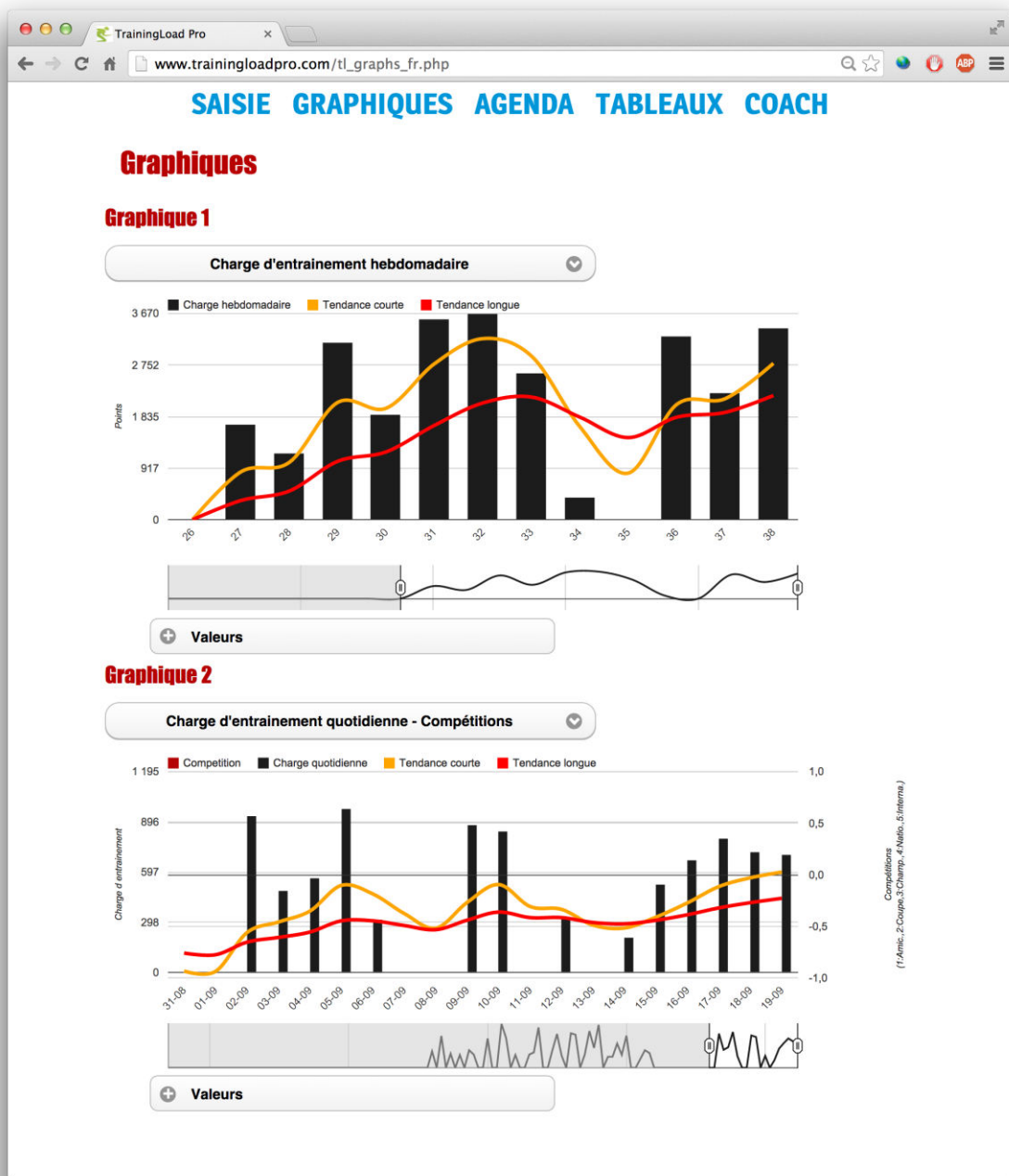


Figure 31 : TrainingLoad Pro - Graphiques

Une page permet de visualiser les données sous formes graphiques (figure 31) et sous formes tabulaires (figure 33). Le placement du curseur sur le graphique affiche la valeur numérique correspondante.

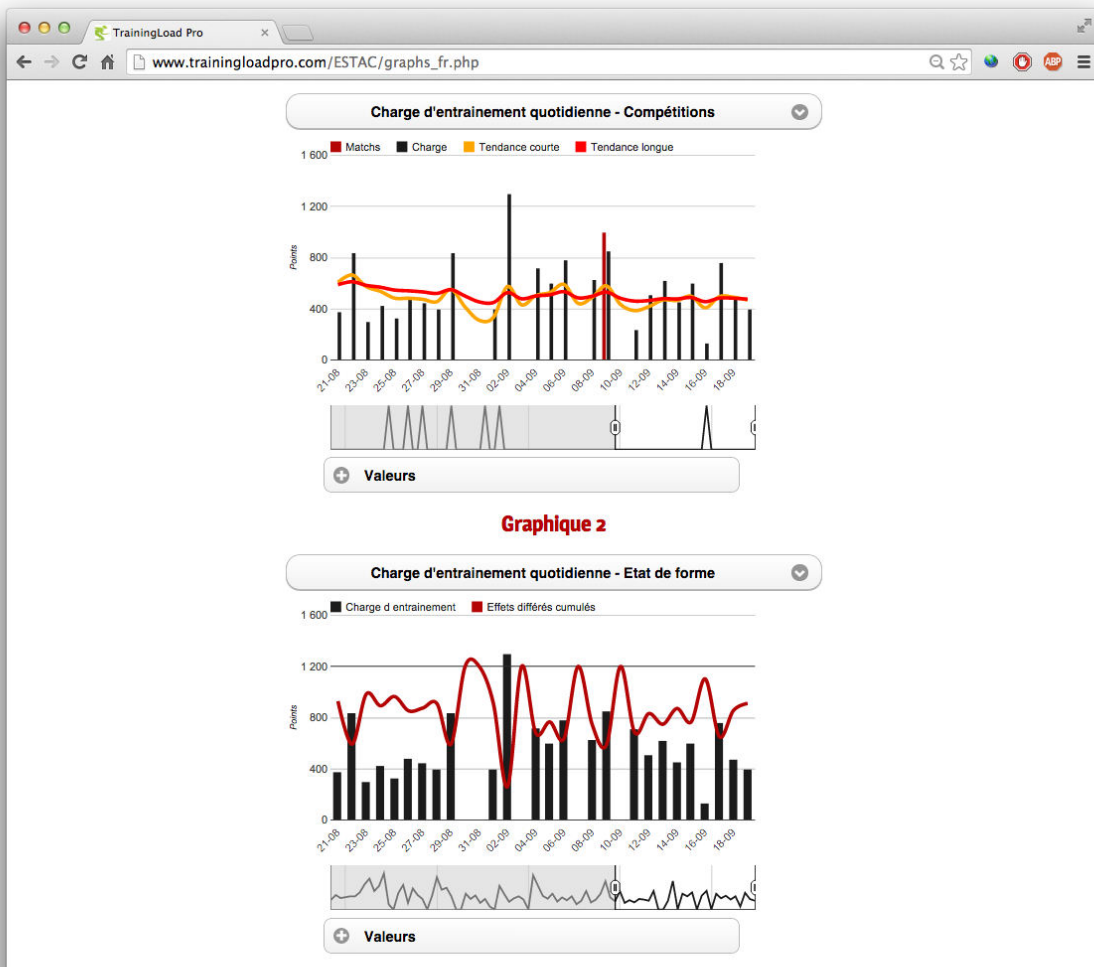


Figure 32 : TrainingLoad Pro - Graphiques - État de forme et charge d'entraînement quotidienne

Les compétitions sont schématisées par des colonnes rouges (figure 32), déclinées en plusieurs hauteurs suivant le type de compétitions (championnat, Coupe de France, match amical)

Pour les graphiques, il est possible d'afficher des tendances pour chacun des marqueurs (figure 32). La tendance est une moyenne mobile exponentielle du marqueur sur N jours ou N semaines. La tendance « courte » (en orange) a une valeur de N inférieure à la tendance « longue » (en rouge). Elles sont paramétrées par défaut à 7 et 21 jours pour les

graphiques quotidiens et à 3 et 9 semaines pour les graphiques hebdomadaires.

L'objectif prioritaire est ici de segmenter les données en contextes informationnels fortement cohérents, simples à utiliser et correspondant à une activité décisionnelle particulière. C'est la partie qui organise les informations et présente les résultats.

The screenshot shows the 'Tableaux' section of the TrainingLoad Pro application. It features a main navigation bar with 'SAISIE GRAPHIQUES AGENDA TABLEAUX COACH' and a sub-section 'Tableaux' with a 'Séances' table. Below the table is a 'Modifier une séance ?' button set to 'Non' and a 'Contenus' table.

Séances

Séance	Heure	Duree	Charge	Theme	Intensite	Maximum	Maitrise	Fatigue	Douleur	Somm
08-09-2014	14:00:00		70	560 Course	8	9	6	7	0	1
07-09-2014	09:00:00		80	800 Course	10	10	6	9	3	2
06-09-2014	19:00:00		40	320 Cyclisme	8	10	2	5	0	2
04-09-2014	10:00:00		105	840 Cyclisme	8	10	7	7	0	7
02-09-2014	10:00:00		70	490 Cyclisme	7	8	5	7	0	3
02-09-2014	12:15:00		75	675 Natation	9	10	8	9	0	3
01-09-2014	09:30:00		110	880 Cyclisme	8	10	4	7	0	2
31-08-2014	09:30:00		95	950 Course	10	10	6	9	0	9
28-08-2014	12:15:00		90	720 Natation	8	10	6	7	0	2
28-08-2014	15:00:00		60	600 Course	10	10	3	9	0	2
27-08-2014	14:00:00		45	450 Cyclisme	10	10	2	7	0	4
26-08-2014	12:15:00		80	560 Natation	7	9	6	6	0	2
25-08-2014	21:00:00		30	150 Preparation physique	5	7	1	2	0	3
23-08-2014	11:00:00		60	480 Cyclisme	8	10	5	4	0	2
18-08-2014	10:40:00		60	480 Course	8	10	5	6	0	2
16-08-2014	07:00:00		45	360 Cyclisme	8	8	8	7	0	4
15-08-2014	18:45:00		70	700 Course	10	10	2	8	0	3
04-08-2014	18:00:00		50	400 Course	8	10	2	7	0	1
01-08-2014	15:30:00		40	400 Course	10	10	5	8	0	10
30-07-2014	14:00:00		40	280 Cyclisme	7	9	2	7	0	5
28-07-2014	11:00:00		70	350 Cyclisme	5	7	2	5	0	5
27-07-2014	12:00:00		45	180 Cyclisme	4	6	2	5	0	3
27-07-2014	16:00:00		120	1200 Triathlon	10	10	3	8	0	3

[Télécharger](#)

Modifier une séance ?
 Non

Contenus

Séances	Heure	Theme	Objectif	Periode	Dominante	Dominante	Contenus
08-09-2014	14:00:00	Course					
07-09-2014	09:00:00	Course					
06-09-2014	19:00:00	Cyclisme					
04-09-2014	10:00:00	Cyclisme					
02-09-2014	10:00:00	Cyclisme					
02-09-2014	12:15:00	Natation					
01-09-2014	09:30:00	Cyclisme					

Figure 33 : TrainingLoad Pro - Tableaux

3.2.2.5- Base de données

TrainingLoad Pro est développé avec la suite WAMP 2.2^{V.E} (Windows Apache V.2.2.22 MySQL V.5.5.24 PHP V.5.3.13) pour effectuer les opérations sur la base de données relationnelles. Des instructions, en langage SQL, sont incorporées dans le code source du programme (embedded SQL). TrainingLoadPro a fait l'objet d'un dépôt IDDN (IDDN.FR.001.410007.000.S.P.2013.000.31500) auprès de l'Agence pour la Protection

des Programmes (APP).

Le cahier des charges nous a conduits à définir les fonctions primaires et les fonctions secondaires suivantes :

Les fonctions primaires sont :

- Importer des données des différents outils de saisie
- Réaliser des calculs
- Représenter les données sous forme graphique
- Exporter des données et des graphiques

Les fonctions secondaires sont de gérer les :

- Joueurs
- Séances
- Graphiques
- Compétitions
- Tests
- Bases de données

3.2.2.5.1- Opérations sur la base de données

La base de données est composée de trois tables. Une table pour les dates, une pour les sportifs et une pour les entraînements. Toutes les informations liées aux entraînements sont stockées dans des champs regroupés dans ces tables.

Les instructions de manipulation des données SQL contenues dans la base effectuent les opérations et commencent par les mots clés SELECT, UPDATE, INSERT et DELETE qui correspondent respectivement aux opérations de recherche de contenu, de modification, d'ajout et de suppression.

Les mots-clés FROM, GROUP, HAVING, ORDER BY permettent d'indiquer les opérations d'algèbre relationnelle à effectuer en vue d'obtenir le contenu à manipuler. Les requêtes SQL affichent les contenus de champs qui appartiennent à une ou plusieurs tables pour les afficher selon certains critères.

Exemples de requêtes SQL :

```
1. SELECT DISTINCT equipe FROM tablesportifs ORDER BY equipe ASC
```

Actions réalisées :

Afficher par ordre alphabétique croissant les noms des équipes présents dans la table « tablesportifs » en omettant les doublons.

```
2. SELECT
SUM (charge) AS SommeChargeQuo,
SUM (IF (coefficient > 0, coefficient, null)) AS SommeIntensiteQuo,
MAX (sommeil) AS SommeSommeilQuo,
COUNT (IF (charge > 0, charge, null)) AS NbSeancesJours
FROM tablecharges
WHERE sportif='Nom_du_sportif'
GROUP BY date
HAVING date BETWEEN '2012-08-01' AND '2013-05-01'
```

Actions réalisées :

Afficher,
la charge
le total de points si l'intensité est supérieure à 0
la valeur maximale du sommeil
le nombre de séances (charge supérieure à 0)
présents dans la table 'tablecharges'
pour le sportif 'Nom_du_sportif'
regroupés quotidiennement
pour des dates comprises entre le '2012-08-01' AND '2013-05-01'

3.2.2.5.2- Paramétrage

Pour chaque sportif, il est nécessaire de configurer à minima et a priori les paramètres d'amortissement θ , de période T et accessoirement de phase (figure 46). Par défaut, les valeurs sont positionnées respectivement sur 5, 11 et 0. Les deux premiers paramètres sont les plus importants, la phase ne sert que de réglage pour les graphiques. Ce sont les analyses statistiques des tests qui permettront de déterminer par itération les paramètres individuels d'amortissement et de période.

Compte tenu de leurs caractéristiques personnelles, de leurs expériences, et de leurs réactivités individuelles, les réponses de sportifs différents aux mêmes entraînements font montre d'une très grande variabilité. Ce sera donc par la réalisation répétée de tests de terrain qu'il sera possible d'individualiser les deux paramètres T et θ .

Le nombre de dix valeurs mesurées par paramètre du modèle semble faire consensus parmi les auteurs bien que de nombreuses études en présentent moins (tableau 10, page 82).

3.3- SUJETS

Cette étude a été réalisée avec six volleyeuses professionnelles françaises et étrangères évoluant en Ligue A féminine Française. Toutes ont été informées préalablement des objectifs poursuivis et des procédures expérimentales et ont donné leur consentement pour participer à cette recherche. Cette étude a été conduite dans le respect de la Déclaration d'Helsinki.

La moyenne pour la stature, la masse corporelle, la masse grasse et l'âge était de $1,80 \pm 0,07$ cm, $69,2 \pm 9,8$ kg, $18,6 \pm 2,7$ % et $20,8 \pm 2,4$ ans, respectivement (tableau 13). Les mesures du poids et de la masse grasse ont été réalisées sur une balance Tanita BC 601 (Tanita, Tokyo, Japon).

Code	stature (m)	masse kg	Masse grasse (%)	Âge (années)
J1	1,85	77	19	23
J2	1,83	68	19	19
J3	1,78	68	18	23
J4	1,87	80	22	23
J5	1,68	52	14	18
J6	1,76	70	20	19
Moyenne	1,80	69,2	18,6	20,8
Écart-type	0,07	9,8	2,7	2,4

Tableau 13 : Caractéristiques morphologiques des joueuses

Les joueuses sont de trois nationalités différentes, toutes droitrières et spécialisées à un poste (deux centrales, deux passeuses, une libéro et une attaquante-réceptionneuse).

3.3.1- Collecte des données

Les données d'entraînement ont été collectées pendant les neuf mois de la saison régulière. Le programme et les contenus d'entraînement ont été planifiés par les entraîneurs de l'équipe. Les joueuses s'entraînaient en moyenne huit fois par semaine, comprenant une séance de musculation, et participaient en moyenne à un match chaque week-end durant la période de compétition.

Chaque joueuse saisissait la date, l'heure de début de séance, la durée réelle de pratique et le niveau de ses perceptions pour chacun des marqueurs dans un délai

maximum de 20 minutes après la fin de chaque entraînement ou de chaque compétition (Foster et coll., 1995). La saisie était réalisée sur leur smartphone ou tablette personnelle.

L'utilisation des échelles visuelles électroniques ainsi que leurs intitulés ont été bien expliqués aux joueuses et nous nous sommes assurés de leur bonne compréhension avant de leur demander de les utiliser. Si une joueuse ressentait une ou plusieurs douleurs, elle devait saisir le niveau d'intensité de la douleur perçue, sa localisation anatomique et son mécanisme d'apparition. Tous les items ont été traduits en langue anglaise par une enseignante bilingue.

Mesurée quotidiennement, la CE est définie comme le produit du volume et de l'intensité. Elle est exprimée en unité arbitraire (u.a.). Le volume est exprimé en minutes mesurées du début de l'échauffement à la fin de la dernière activité physique de l'entraînement. L'intensité est cotée en unité arbitraire au moyen d'une échelle visuelle électronique numérotée de 1 à 10 dont les valeurs ne sont pas visibles par la joueuse au moment de la saisie (figure 29). Tous les entraînements sont quantifiés de la manière la plus précise. La valeur nulle (0 u.a.) est associée à un jour sans entraînement.

3.3.2- Tests

3.3.2.1- Introduction

Comme la CE est essentielle en tant que valeur d'entrée d'une modélisation, la mesure de la performance, comme valeur de sortie, doit être aussi précise que possible et devrait s'effectuer dans les conditions les plus proches de la compétition.

Le volley-ball est décrit comme un sport intermittent en ce sens où il alterne des périodes d'efforts intenses avec de courtes périodes de récupération. 76,6 % des efforts durent en moyenne 11 secondes, variant de 3 secondes pour un ace à 40 secondes pour les échanges les plus longs. 44 % des périodes de repos durent en moyenne 12 secondes (Sheppard et coll., 2007).

La performance à haut niveau peut être limitée par les capacités physiques (Malousaris et coll., 2008 ; Martin-Martillas et coll., 2013 ; Gastin et coll., 2013) comme la vitesse et la capacité à sauter verticalement (Lidor & Ziv, 2010 ; Smith et coll., 1992), plus

particulièrement pour le bloc et l'attaque (Eom & Schutz, 1992).

Plus facile dans les sports individuels qui ne durent que quelques secondes, la mesure de la performance peut devenir complexe pour les sports collectifs dont l'épreuve peut excéder plusieurs dizaines de minutes. Il est alors nécessaire de trouver un ou plusieurs tests de substitution qui ne soient pas tant prédictifs de la performance que de la capacité de performance, car au volley-ball les performances techniques et tactiques individuelles et collectives en matchs ne sont pas des marqueurs suffisamment fiables et valides. Marcelino et coll. (2011), en analysant le service, le bloc, l'attaque et le gain du point en fonction des postes, des zones et de leurs efficacités, montrent en effet que lors de la Coupe du Monde de volley 2007, les équipes prennent plus de risques tactiques et techniques en situation d'indécision qu'en situations équilibrées, qu'elles aient ou non l'avantage. L'efficacité des performances techniques et tactiques est donc très dépendante du niveau des adversaires et des actions de jeu, ce qui rend leur utilisation et leur interprétation difficiles.

Les tests de substitutions ne doivent pas non plus engendrer de surcoût énergétique ou motivationnel, ni de perturbation du déroulement de la séance, conditions incontournables pour les réaliser le plus souvent possible. L'idéal serait de pouvoir les intégrer dans la séance comme exercice.

3.3.2.2- Saut vertical

Le saut à dominante verticale est une compétence motrice commune à la majorité des gestes techniques fondamentaux du volley-ball (service smashé, attaque, passe sautée, bloc). Le saut vertical se révèle être un facteur discriminant de la pratique à haut niveau (Ziv & Lidor, 2010a). Smith et coll. (1992), en comparant l'équipe nationale canadienne et l'équipe des Universiades, montrent en effet que des différences existent pour la vitesse de déplacement (20 m), les hauteurs de sauts d'attaque, de bloc et la VO_2 max ; mais qu'il n'y a pas de différences significatives en termes de taille et de puissance anaérobie. En comparant des joueuses de lycée et d'université expérimentées, Schaal et coll. (2013) montrent également que les différences physiques se situent au niveau de la coordination et de la capacité à sauter verticalement. En comparant les tests verticaux (Contremouvement jump - CMJ, Squat jump - SJ) réalisés sur le sable ou sur parquet de joueurs de beach-

volley, Bishop D.J. (2003) a également montré que cette aptitude au saut vertical est une compétence transversale indépendante de la surface de saut, mais aussi du type de chaussure utilisée (Lapole et coll. 2013).

De plus, Bobberts et coll. (2011) ont montré que la capacité à sauter verticalement était corrélée à la fatigue et que la diminution de la performance était en partie due à une inadéquation entre le contrôle neuromusculaire et les propriétés musculo-squelettiques. Ronglan et coll. (2006) notent des diminutions de hauteur de CMJ de 4 à 7 % après trois jours d'un tournoi international de handball et de 2 à 6 % après un camp d'entraînement de cinq jours.

Notre choix s'est donc porté sur deux tests de détente verticale proches de l'activité de compétition, le CMJ avec et sans élan. L'hypothèse générale est que les variations de la CPQ doivent se traduire en variations de résultats aux tests (Marques et coll., 2008 ; Ziv & Lidor, 2010a et b).

Dans une étude menée sur quatre-vingt-quinze joueurs de haut niveau, Sattler et coll. (2012) comparent deux tests spécifiques ("*block jump*" et "*attack jump*") avec le CMJ et le SJ, et montrent ainsi que la fiabilité des tests de saut varie de 0,97 à 0,99 pour l'alpha de Cronbach, de 0,93 à 0,97 pour les coefficients de corrélation interitem et de 2,1 à 2,8 pour les coefficients de variation. Balsalobre-Fernandez et coll. (2014) montrent également que les mesures quotidiennes de CE avec une échelle de perception de l'effort, de cortisol salivaire et de CMJ sont de bons marqueurs du processus d'entraînement. Johnston et coll. (2013) montrent que le CMJ est un test suffisamment sensible pour suivre la fonction neuromusculaire chez des étudiants joueurs de rugby de niveau international.

L'utilisation des bras au test de CMJ est souvent source de débats (Walsh et coll., 2007 ; Cormack et coll., 2008 ; Freitas et coll., 2014). En étudiant le rôle de l'action des bras sur la performance au CMJ chez des femmes adultes et de jeunes filles, Harrison & Moroney (2007) ont montré que ces dernières sont aussi efficaces que les femmes adultes dans l'utilisation de leurs bras. Floria & Harrison (2012) montrent que les jeunes filles profitent différemment des jeunes femmes de l'action de leurs bras en améliorant leur hauteur au décollage, alors que les adultes l'améliorent en augmentant la hauteur de vol.

Dans les études sur les variations de force et de puissance des membres inférieurs chez la femme et l'homme sportif, le saut avec contre-mouvement est le test le plus

courant, le plus fiable et le plus valide (Slinde et coll., 2008 ; Markovic et coll., 2004 ; Moir et coll., 2008).

Les mesures des sauts verticaux ont été réalisées tous les mois, en début d'entraînement, après l'échauffement, à l'aide du système de détection optique OptoJump Next composé de barres émettrices et de barres réceptrices de 1 cm d'épaisseur (figure 34) dont la validité et la fiabilité sont très bonnes (Glatthorn et coll., 2011). Les données sont issues du logiciel associé OptoJump Next v. 1.7.3.0. Une longueur de 1 mètre a été utilisée pour le CMJ sans élan ainsi que le CMJ avec élan face au filet. La fréquence d'échantillonnage est de 1000 Hz.



Figure 34 : OptoJump Next

La hauteur maximale verticale de saut est déterminée à partir du temps de vol par

$$h_{max} = \frac{1}{8} \times g \times t_v^2 \quad (\text{Équation 56})$$

Où h est la hauteur (en cm), g la gravité (981 cm/s) et t_v le temps de vol (en secondes) (Glatthorn et coll., 2011).

3.3.2.2.1- Sans élan

Le test consiste à franchir la distance verticale la plus grande possible. D'une position de départ debout, cela consiste, après une flexion préalable proche de 90° d'angulation du membre inférieur, à sauter le plus haut possible à l'aide des bras, et à minimiser le plus possible le déplacement horizontal.

3.3.2.2.2- Avec élan, face au filet

Le test, inspiré du Spike Jump Test, consiste à franchir la distance verticale la plus

grande possible. Suite à un élan libre de trois foulées, la joueuse doit sauter le plus haut possible face au filet, appel deux pieds, et simuler un smash. Elle doit veiller à minimiser le plus possible le déplacement horizontal. Les barres sont espacées de deux mètres pour éviter les blessures consécutives à un déplacement horizontal trop marqué (figure 35).

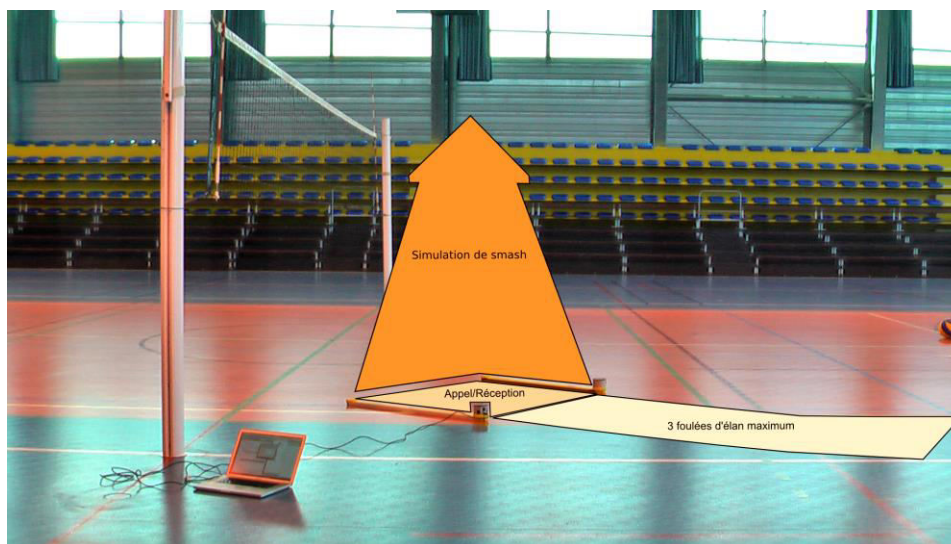


Figure 35 : CMJ avec élan face au filet

3.4- ANALYSES STATISTIQUES

Toutes les analyses ont été réalisées avec le logiciel open source Tanagra⁷¹ développé par Rakotomalala E. (2005).

3.4.1- Modélisation de la capacité de performance quotidienne

Compte tenu du caractère non linéaire et non monotone des variations de la capacité de performance, les corrélations ont été évaluées avec le tau de Kendall (τ) qui a également l'intérêt de transcender la métrique des variables mesurées. Les paramètres τ_a , τ_f , k_a et k_f du modèle de Banister et coll. (1975) (équation 4) et les paramètres T et θ de notre modèle (équation 54) ont été déterminés par la méthode des moindres carrés non linéaires entre les valeurs prédites et les performances réelles.

Le coefficient de détermination R^2 a été utilisé pour comparer les modèles. La

⁷¹ <http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/tanagra/fr/tanagra.html>

normalité des résidus a été réalisée avec le test de Shapiro-Wilk pour effectif réduit (Hellard et coll., 2006). Puisqu'il ne semble pas y avoir de consensus réel sur le R^2 pour les régressions non linéaires (Spiess et Neumeyer, 2010), nous avons aussi utilisé l'erreur quadratique moyenne (MSE) pour mesurer les distances entre les valeurs prédites et les valeurs observées. Le coefficient de corrélation de Spearman (ρ) a été utilisé pour évaluer les associations entre les paramètres des modèles et l'âge des joueuses. Pour toutes les analyses effectuées, le seuil de significativité était fixé à $p < 0,05$.

Les valeurs des performances des graphiques individuels calculées avec le modèle de Banister et coll. (1975) et le modèle basé sur les oscillations harmoniques amorties sont normalisées selon la formule :

$$z = \frac{\text{donnée} - \text{moyenne}}{\text{écart-type}} \quad (\text{Équation 57})$$

Où z est la donnée normalisée

3.4.2- Mesure longitudinale des marqueurs

La CE a été calculée comme le produit de la durée réelle de pratique par l'intensité moyenne perçue et a été exprimée en unités arbitraires (u.a.). Les valeurs ont été groupées quotidiennement. Pour résumer les données dans leurs dimensions les plus importantes et éviter la surreprésentation des certaines CE, nous avons :

1/ échantillonné individuellement la charge d'entraînement par strates de 50 u.a. (soit approximativement 10% de la charge moyenne quotidienne). Pour chaque strate nous avons retenu la moyenne des valeurs des marqueurs. Pour les marqueurs Sommeil et Endormissement, c'est la valeur maximale quotidienne qui était retenue, car il s'agissait d'évaluer la nuit précédant la journée d'entraînement.

2/ appliqué un processus statistique en quatre étapes basé sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP). La classification de variables nous semble utile dans la recherche de structures sous-jacentes dans les données et d'aller au-delà de l'utilisation du coefficient de corrélation r pour mesurer la proximité entre les variables. Elle permet de repérer les groupes de variables corrélées, apportant le même type d'informations, et de distinguer les groupes de variables orthogonales, rapportant des informations

complémentaires (Rakotomalala, E., 2007).

3.4.2.1- Étape 1 : Analyses en Composantes Principales

Le test des « bâtons brisés » (« *Broken-stick* ») a été utilisé pour choisir le nombre approprié d'axes. Ce test définit une valeur seuil spécifique pour chaque axe. L'indice KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) indique la capacité de l'ACP à résumer l'information en un nombre réduit de facteurs. Il oppose les corrélations brutes (relation entre les variables) et partielles (relations entre les variables en contrôlant l'impact de toutes les autres).

3.4.2.2- Étape 2 : Rotation VARIMAX

Pour faciliter l'interprétation des axes de l'ACP nous avons réalisé une rotation VARIMAX qui consiste à faire pivoter les axes factoriels de manière à maximiser leurs corrélations avec les variables (Rakotomalala, E., 2007). Le cercle de corrélations est un outil graphique qui permet d'analyser et d'interpréter les axes.

3.4.2.3- Étape 3 : Classification Hiérarchique Ascendante

Pour confirmer les résultats de l'ACP et améliorer la représentation schématique des variables, nous avons réalisé une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les variables. L'indicateur (1-R² ratio) indique le rapport entre (1-R² own cluster) et (1-R² next closest). Plus petite est sa valeur, meilleure est l'affectation de la variable au cluster. (Rakotomalala, R., 2007).

3.4.2.4- Étape 4 : Corrélations interclasses.

La qualité du partitionnement a été évaluée en calculant la corrélation entre les clusters. La typologie était considérée satisfaisante si les clusters⁷² étaient faiblement corrélés ou non corrélés. Afin de déterminer quel groupe de variables expliquerait le mieux les variations de capacité de performance et de douleurs perçues, nous avons calculé les

⁷² Clustering : structuration des données en classes homogènes. Il s'agit regrouper les points en clusters ou classes tels que les données d'un cluster soient les plus similaires possibles.

corrélations entre les clusters et ces deux variables. Les corrélations sont d'autant plus significatives que les clusters sont aussi orthogonaux que possible.

3.5- RESULTATS

3.5.1- Modélisation de la capacité de performance quotidienne

Deux cent cinquante entraînements ont été réalisés. Aucune joueuse ne s'est trouvée dans l'incapacité de s'entraîner plus d'une journée. Les joueuses se sont entraînées en moyenne $8 \pm 0,5$ fois par semaine, avec en moyenne $2 \pm 0,2$ jours de repos par semaine. Le nombre de jours de repos était significativement corrélé avec le paramètre T ($\rho=0,86$, $p<0,02$).

La hauteur au CMJ variait de manière sinusoïdale pour toutes les joueuses, pour des valeurs de 40,7 cm à 51,8 cm. La meilleure moyenne au CMJ était de $48,6 \pm 1,8$ cm la moyenne générale était $45,4 \pm 1,8$ cm. La moyenne la plus basse était de $42,9 \pm 1,9$ cm (tableau 14).

Code	Performances				
	Maximum	Minimum	Moyenne	Écart-type	Nb de tests
J1	48,8	40,7	43,8	2,7	6
J2	48,2	43,3	44,9	1,6	8
J3	49,4	45,9	48,1	1,3	10
J4	47,6	42,4	45,8	1,5	10
J5	51,8	44,4	47,0	2,3	9
J6	45,8	40,8	42,8	1,9	9
Moyenne	48,6	42,9	45,4	1,9	8,7
Écart-type	1,8	1,9	1,8	0,5	1,4

Tableau 14 : Test de Contremouvement Jump (CMJ) sans élan bras libres

La moyenne des valeurs maximales de chaque joueuse pour le test de CMJ avec élan, bras libres, était de 54,1±2,2 cm (tableau 15).

Code	Performances				
	Maximum	Minimum	Moyenne	Écart-type	Nb de tests
J1	54,4	46,2	49,1	2,4	7
J2	52,9	49	50,4	1,4	6
J3	57,9	52,1	53,7	1,9	7
J4	52,4	46	49,8	2,3	7
J5	55,7	51	53,9	1,6	7
J6	51,2	45,5	48,3	2,2	-
Moyenne	54,1	48,3	50,9	2,0	6,8
Écart-type	2,2	2,6	2,2	0,4	0,4

Tableau 15 : Test de Contremouvement Jump (CMJ) avec élan bras libres, face au filet

Les valeurs du test de CMJ avec élan (devant le filet) variaient de manière sinusoïdale pour toutes les joueuses pour des valeurs de 45,5 cm (joueuse J6) à 57,9 cm (joueuse J3). La moyenne du maximum était de 54,1±2,2 cm. La moyenne générale était de 50,9 cm. La moyenne la plus faible était de 48,3 cm±2,6 cm.

Le paramètre θ , la période T et le tau de Kendall entre la CPQ et le CMJ variaient de 0,57 (p=0,04) à 0,72 (p=0,01) de 0,52 (p=0,05) à 0,78 (p=0,01) pour le CMJ avec élan. Les corrélations individuelles sont présentées dans les tableaux 16 et 17.

	Paramètre de la CPQ			sCMJ		rCMJ	
	Age	Amortissement θ	Période T	τ	p	τ	p
J1	27	6	13	0,61	0,02	0,55	0,03
J2	19	5	9	0,71	0,01	0,73	0,03
J3	23	6	12	0,58	0,01	0,52	0,05
J4	23	7	12	0,70	0,01	0,78	0,01
J5	18	5	9	0,57	0,04	0,66	0,01
J6	19	5	7	0,72	0,01	NS	NS
Moy.	22	6	10	0,63	0,02	0,64	0,03
EC.	3	1	2	0,07	0,01	0,11	0,01

Table 16 : Paramètres de la CPQ modélisée durant la période d'étude de neuf mois et coefficient de Kendall τ pour les tests de CMJ sans élan (sCMJ) et avec élan (rCMJ). (J : Joueuse, âge, paramètre d'amortissement θ , période T de la CPQ, tau de Kendall τ et valeur p)

3.5.2- Comparaison avec le modèle de Banister et coll. (1975)

La modélisation de la CPQ est plus précise que le modèle de Banister.

	k_a	k_f	τ_a	τ_f
J1	0,015	0,041	20	6
J2	0,031	0,071	18	8
J3	0,025	0,092	20	5
J4	0,004	0,010	13	7
J5	0,028	0,131	25	8
J6	0,011	0,044	30	7
Moy.	0,019	0,065	21	7
EC.	0,011	0,043	6	1

Table 17 : Paramètres du modèle de Banister et coll., 1975 (Morton et coll., 1990). (τ_a and τ_f , constantes de temps de fitness et de fatigue. k_a et k_f , facteurs pondérateurs de fitness et de fatigue)

Les valeurs du R^2 s'échantillonnent de 0,24 à 0,82 pour le modèle de Banister et coll. (1975) et de 0,73 à 0,97 pour la modélisation de la CPQ (tableau 18).

Les valeurs de MSE s'échantillonnent de 0,06 à 0,71 pour le modèle de Banister et coll. (1975) et de 0,33 à 2,02 pour la modélisation de la CPQ. Les valeurs sont reportées dans le tableau 18. Les valeurs sont distribuées de manière aléatoire autour de la meilleure courbe d'ajustement de chaque modèle.

	Modélisation de la CPQ				Modèle de Banister			
	R^2	MSE	d	p-valeur	R^2	MSE	d	p-valeur
P1	0,96	0,06	3	0,24	0,81	0,48	4	0,53
P2	0,73	0,71	4	0,64	0,24	2,02	4	0,59
P3	0,78	0,36	3	0,92	0,62	0,60	3	0,91
P4	0,78	0,33	4	0,98	0,82	0,35	4	0,23
P5	0,89	0,22	4	0,15	0,82	0,33	3	0,33
P6	0,97	0,06	3	0,24	0,81	0,48	4	0,53

Tableau 18 : Qualité d'ajustement du modèle de Banister et coll. (1975) et de la modélisation de la CPQ avec le test de CMJ. (R^2 : coefficient de détermination ; MSE : erreur quadratique moyenne ; P1-P6 : joueuses ; d : degré de liberté ; p-valeur du test de Shapiro-Wilk). Le paramètre d'amortissement θ et la période T étaient positivement corrélés avec l'âge ($\rho=0,81$, $p<0,05$ and $\rho=0,86$, $p<0,02$ respectivement).

Les figures 36, 37, 38, 39, 40 et 41 montrent les variations des CPQ, de performance théorique (Banister et coll., 1975) et de CMJ sans élan pour les joueuses J1, J2, J3, J4, J5 et J6. Les valeurs de CPQ et de performances sont normalisées.

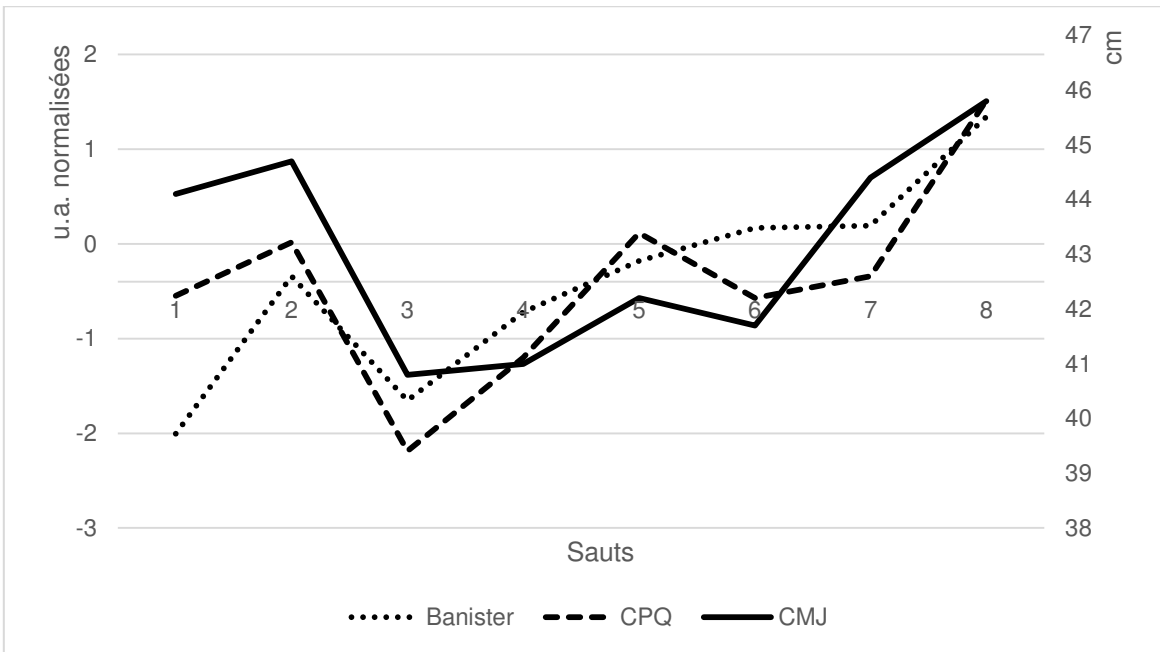


Figure 36 : Tests de contre-mouvement jump sans élan, performance selon le modèle de Banister et coll. (1975) et capacité de performance quotidienne (CPQ) modélisée de la joueuse J1 sur une période de neuf mois. Les valeurs des performances modélisées sont normalisées.

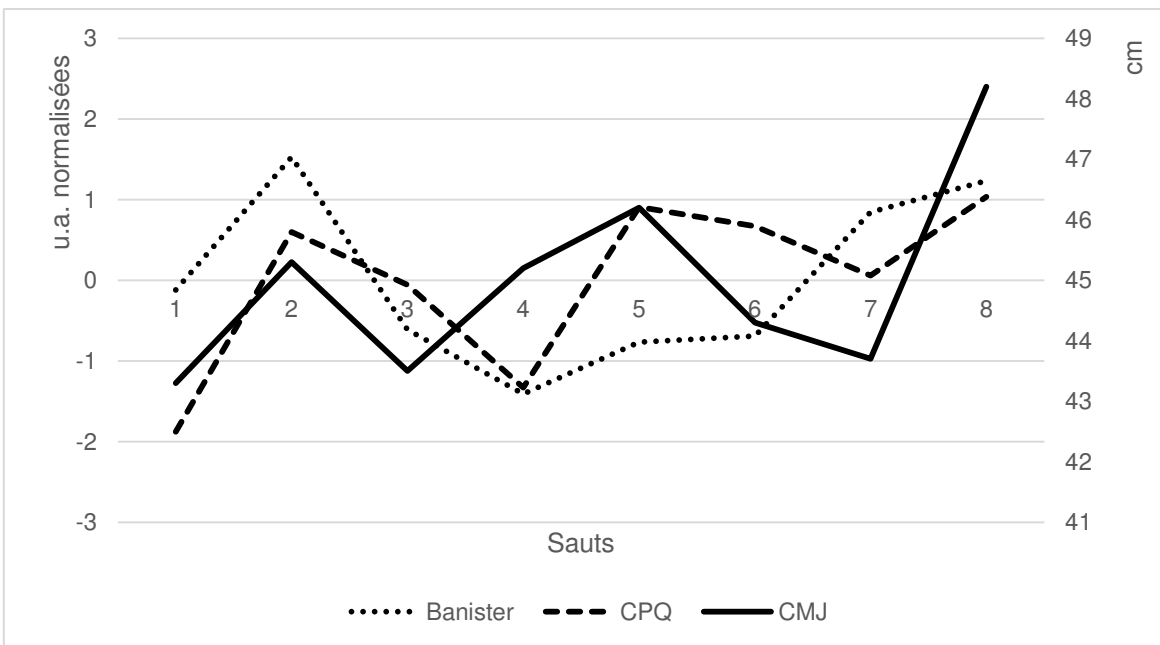


Figure 37 : Tests de contre-mouvement jump sans élan, performance selon le modèle de Banister et coll. (1975) et capacité de performance quotidienne (CPQ) modélisée de la joueuse J2 sur une période de neuf mois. Les valeurs des performances modélisées sont normalisées.

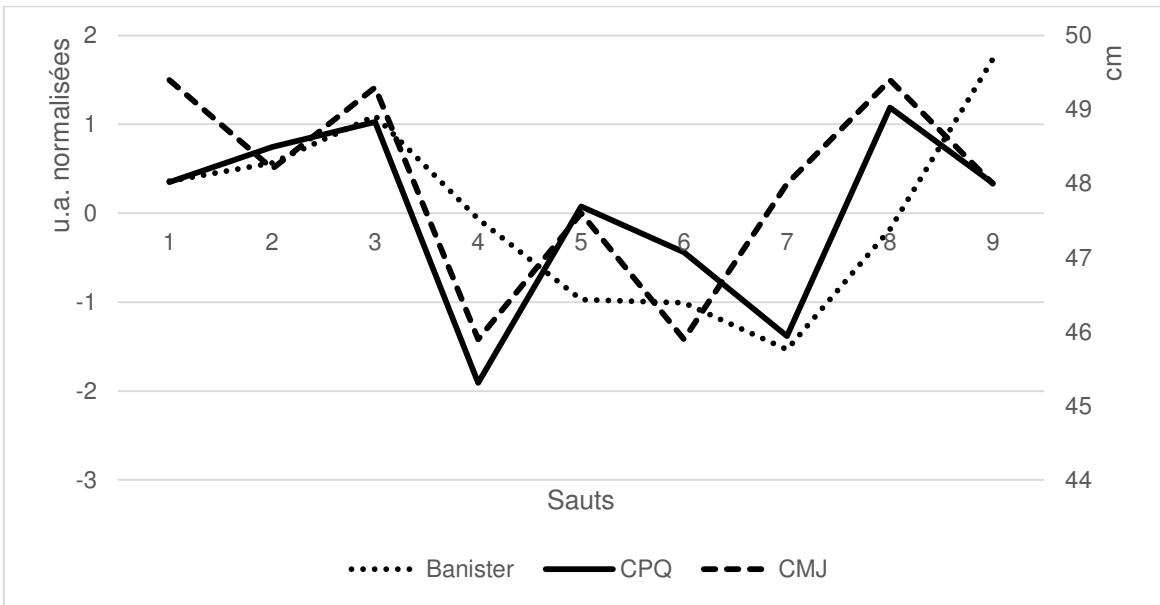


Figure 38 : Tests de contre-mouvement jump sans élan, performance selon le modèle de Banister et coll. (1975) et capacité de performance quotidienne (CPQ) modélisée de la joueuse J3 sur une période de neuf mois. Les valeurs des performances modélisées sont normalisées.

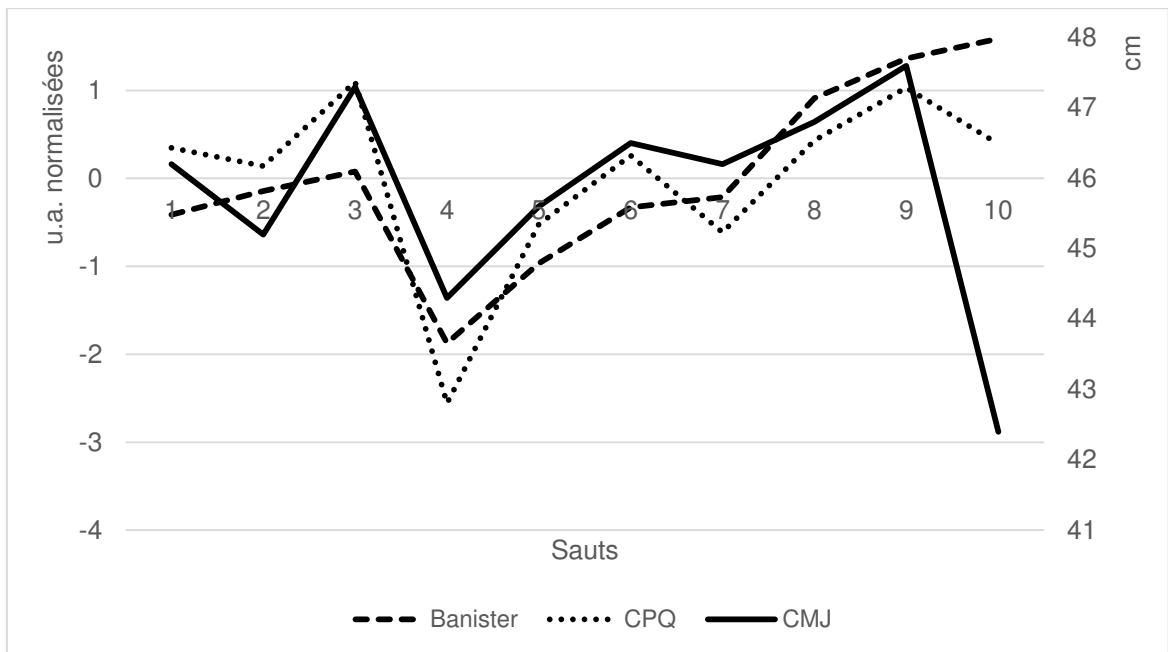


Figure 39 : Tests de contre-mouvement jump sans élan, performance selon le modèle de Banister et coll. (1975) et capacité de performance quotidienne (CPQ) modélisée de la joueuse J4 sur une période de neuf mois. Les valeurs des performances modélisées sont normalisées.

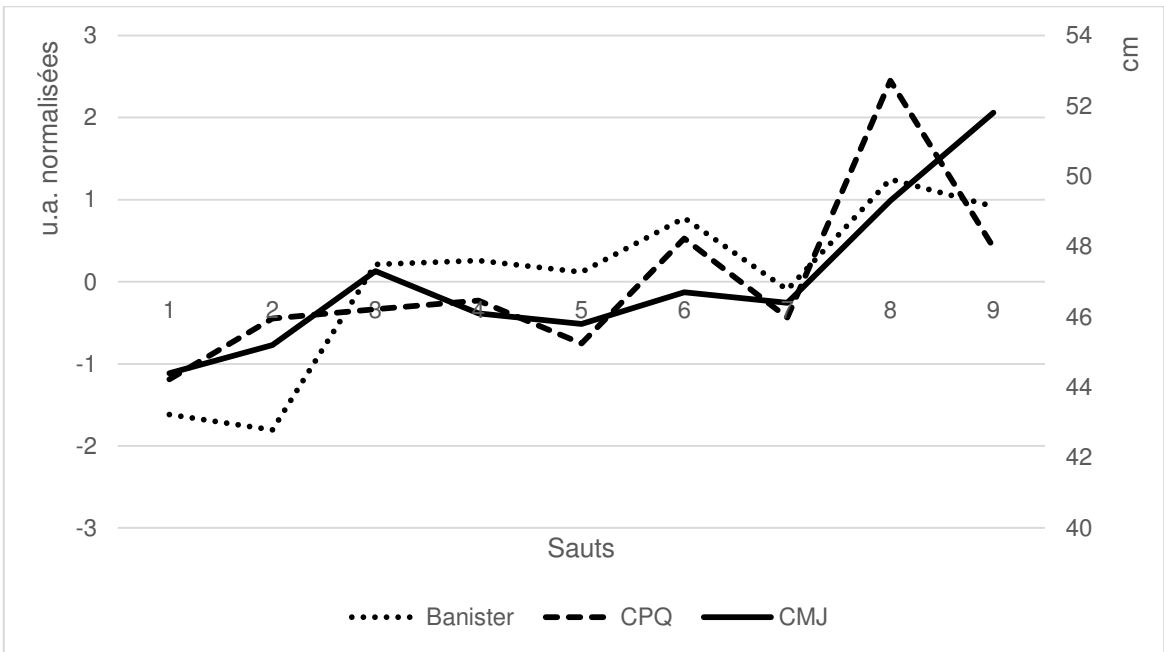


Figure 40 : Tests de contre-mouvement jump sans élan, performance selon le modèle de Banister et coll. (1975) et capacité de performance quotidienne (CPQ) modélisée de la joueuse J5 sur une période de neuf mois. Les valeurs des performances modélisées sont normalisées.



Figure 41 : Tests de contre-mouvement jump sans élan, performance selon le modèle de Banister et coll. (1975) et capacité de performance quotidienne (CPQ) modélisée de la joueuse J6 sur une période de neuf mois. Les valeurs des performances modélisées sont normalisées.

3.5.3- Suivi longitudinal des marqueurs perceptifs

Neuf marqueurs ont été suivis : la charge d'entraînement, la durée effective de la séance, l'intensité moyenne, l'intensité maximale, la fatigue, la maîtrise technique/tactique, l'endormissement, le sommeil, l'humeur.

3.5.3.1- Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (tableau 19) met à jour trois axes expliquant 77,4±4,5 % de la variance totale. L'indice KMO est de 0,65±0,05. Les communalités des items, c'est-à-dire les parts de la variance expliquée par les composantes retenues, sont bien représentées, car présentant toute une corrélation supérieure à 0,50.

Sujets	Var.	Axe 1	Axe 2	Axe 3	KMO
J1	74 %	44%	17%	13%	0,63
J2	82 %	43%	25%	13%	0,62
J3	82 %	45%	24%	13%	0,58
J4	80 %	41%	25%	13%	0,71
J5	75 %	45%	18%	12%	0,70
J6	71 %	43%	16 %	12 %	0,66
Moy.	77,4 %	43,4 %	20,8%	12,7%	0,65
EC	4,5 %	1,7%	4,3%	0,5%	0,05

Tableau 19 : Analyse en Composantes Principales, Variance expliquée (ACP Var.), Indice (Kaiser - Mayer - Olkin (ACP KMO))

3.5.3.2- VARIMAX

La rotation VARIMAX donne des résultats plus clairs en maximisant les corrélations de chaque variable.

Sujets	Var.	Axe 1	Axe 2	Axe 3
J1	74 %	41 %	18 %	15 %
J2	82 %	42 %	25 %	15 %
J3	82 %	44 %	21 %	17 %
J4	80 %	41 %	20 %	19 %
J5	75 %	44 %	16 %	15 %
J6	72 %	39 %	15 %	18 %

Tableau 20 : Rotation VARIMAX, Répartition de la variabilité expliquée pour chaque axe.

Une analyse approfondie permet de déterminer la nature de chacune des dimensions identifiées (tableaux 20 et 21) :

- Le premier axe représente une part prépondérante de la variance expliquée : 41,8 %±1,9 % avec une corrélation de 0,90±0,06 (0,84>|r|>0,94). Quatre items sont significativement corrélés avec cet axe (Charge, r=0,90±0,05 ; Durée, r=0,84±0,10 ; Intensité moyenne, r=0,94±0,02 ; Intensité maximale, r=0,91±0,02) pour les six sujets. Cet axe semble exprimer les paramètres de la CE.
- Le second axe restitue 19,2±3,7 % de la variance totale expliquée avec une corrélation de 0,80±0,11. (0,62>|r|>0,95). L'item Maîtrise est présent sur cet axe pour les six sujets et l'item Humeur pour cinq sujets. Cet axe semble traduire le contexte pédagogique de l'entraînement.
- Le troisième axe représente 16,5±1,8 % de la variance totale expliquée avec une corrélation de 0,73±0,23 (0,54>|r|>0,97). L'item Sommeil est présent sur cet axe pour les six sujets. L'item Endormissement est présent pour 4 sujets. Cet axe semble rassembler les items portant sur le contexte de récupération.

	J1	J2	J3	J4	J5	J6
	Corr.	Corr.	Corr.	Corr.	Corr.	Corr.
Intensité moy.	0,96	0,92	0,96	0,91	0,91	0,95
Charge	0,81	0,88	0,95	0,92	0,94	0,91
Durée	0,83	0,84	0,91	0,85	0,94	0,64
Intensité max.	0,94	0,93	0,90	0,88	0,89	0,93
Fatigue	-0,83	0,63	0,67	0,63	0,78	0,77
Maîtrise	-0,80	-0,94	0,95	0,92	-0,63	0,80
Humeur	-0,56	-0,62	0,89	0,84	-0,69	0,79
Sommeil	0,76	0,97	0,86	0,88	-0,68	0,74
Endormissement	0,63	0,88	0,84	0,94	0,75	0,58

Tableau 21 : Rotation Varimax, Corrélations des variables avec les axes

Pour les six sujets, l'item Fatigue est réparti sur les trois axes factoriels.

3.5.3.2.1- Cercle des corrélations

L'axe 3 du cercle des corrélations de la joueuse J4 traduit les relations entre la CE, ses paramètres et la CPQ. Les paramètres Intensité maximale, Intensité moyenne, Durée et

Charge d'entraînement sont très proches du cercle et de l'axe 3 (à droite ; corrélation positive). La CPQ est également très proche du cercle et de l'axe, 3 mais positionnée à gauche (corrélation négative). Cet axe représente bien les relations entre CE et CPQ (figure 42).

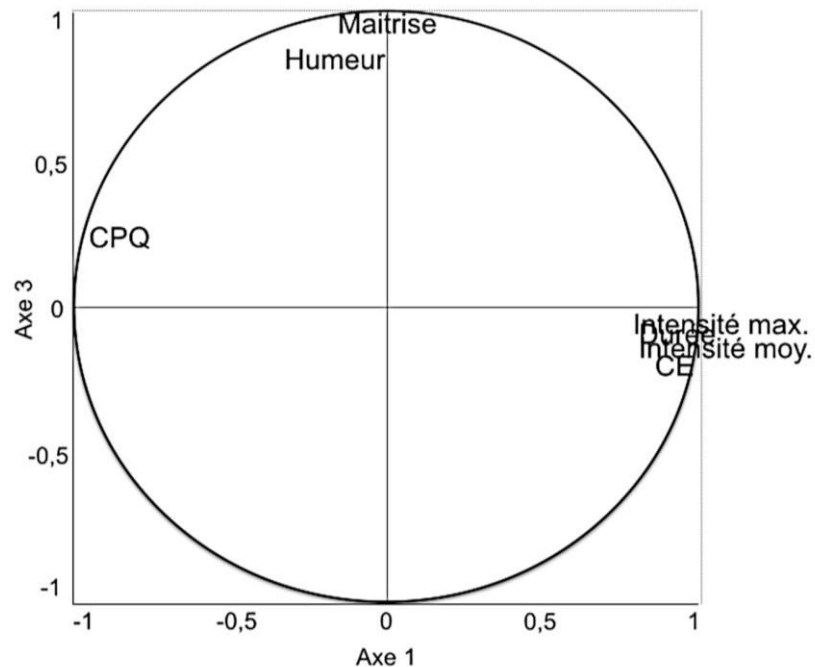


Figure 42 : Cercle des corrélations de la joueuse J4. La CE et la CPQ sont fortement corrélés négativement (axe 3). La maîtrise et l'humeur sont fortement corrélées positivement (axe 1)

Les paramètres Sommeil et Endormissement de la joueuse J4 sont corrélés positivement (axe 3). L'axe 2 traduit le contexte pédagogique d'entraînement. La Maîtrise technique et tactique est fortement corrélée avec l'humeur (figure 43).

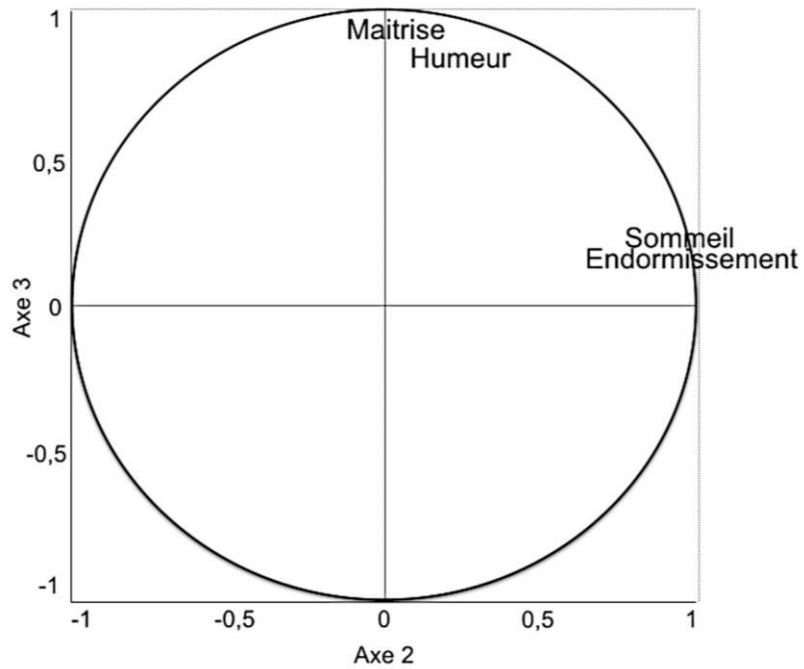


Figure 43 : Cercle des corrélations de la joueuse J4. La maîtrise et l'humeur sont fortement corrélées (axe 2). Le sommeil et l'endormissement sont fortement corrélés (axe 3).

L'axe 2 de la joueuse J4 traduit les relations entre CE et CPQ. L'axe 1 semble traduire le contexte de récupération (c.-à-d., le sommeil et l'endormissement) (figure 44).

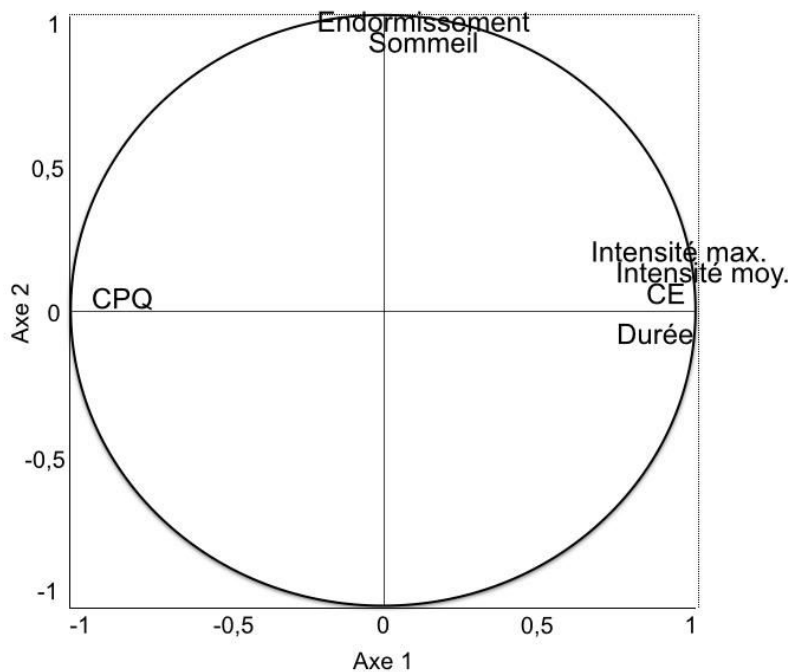


Figure 44 : Cercle des corrélations de la joueuse J4. La CE, ses paramètres et la CPQ sont fortement corrélés (axe 2). Le sommeil et l'endormissement sont fortement corrélés (axe 1).

3.5.3.3- Classification hiérarchique ascendante

La classification hiérarchique ascendante semble confirmer le partitionnement des items en trois clusters (Charge d'entraînement, contexte pédagogique de l'entraînement et contexte de récupération) avec une répartition similaire des items par cluster.

Sujets	Var.	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
J1	68 %	79,8 %	74,6 %	45,7 %
J2	76 %	74,9 %	100 %	71,4 %
J3	80 %	79,5 %	89,5 %	74,6 %
J4	78 %	72,7 %	83,9 %	87,3 %
J5	68 %	88 %	48 %	61,8 %
J6	69 %	79,3 %	66,2 %	57,9 %
Moy.	73,1 %	79 %	77 %	66,4 %
EC	5,5 %	5,3 %	18,4 %	14,5 %

Tableau 22 : Classification Hiérarchique Ascendante, Résumé des clusters. Cluster 1 : cluster Entraînement. Cluster 2 : cluster Contexte. Cluster 3 : cluster Récupération.

Dans cette typologie en trois clusters, 73,1 %±5,1 % de la variabilité totale est restituée par ce partitionnement. Les corrélations de chaque variable avec l'ensemble des clusters (tableau 23) sont pour 75 % supérieures à 0,80 et les variables ne sont corrélées qu'avec un seul cluster.

	J1		J2		J3		J4		J5		J6		Corr.	
	Corr.	Clus.	Corr.	Clus.	Corr.	Clus.	Corr.	Clus.	Corr.	Clus.	Corr.	Clus.	Moy.	EC
Charge	0,88	E	0,88	E	0,96	E	0,93	E	0,94	E	0,95	E	0,92	0,04
Durée	0,88	E	0,83	E	0,91	E	0,85	E	0,94	E	0,69	E	0,85	0,09
Intensité moy.	0,99	E	0,93	E	0,97	E	0,92	E	0,93	E	0,93	E	0,95	0,03
Intensité max.	0,93	E	0,93	E	0,92	E	0,90	E	0,91	E	0,95	E	0,92	0,02
Maitrise	0,86	R	1,00	C	0,94	C	0,91	C	0,50	-	0,81	C	0,84	0,18
Fatigue	0,86	R	0,64	R	0,64	E	0,60	E	0,78	R	0,65	R	0,70	0,10
Endormissement	0,73	C	0,88	R	0,86	R	0,93	R	0,78	R	0,80	R	0,83	0,07
Sommeil	0,73	C	0,96	R	0,86	R	0,93	R	0,74	C	0,81	R	0,84	0,10
Humeur	-0,56	-	-0,71	E	0,94	C	0,91	C	0,79	C	0,81	C	0,79	0,14

Tableau 23 : Classification Hiérarchique Ascendante, Corrélations des variables avec les clusters. E : cluster Entraînement. R : cluster Récupération. C : cluster Contexte.

Le dendrogramme permet de visualiser l'évolution de l'agrégation des variables. La figure 44 illustre le partitionnement de la joueuse J4. Le cluster 1 regroupe les variables liées au calcul de la CE et à la CPQ. Pour cette joueuse, la variable fatigue est attachée à ce

cluster mais l'indicateur (1-R² ratio) (tableau 24) montre toutefois qu'elle n'y est pas totalement bien assortie (1-R² ratio=0,64).

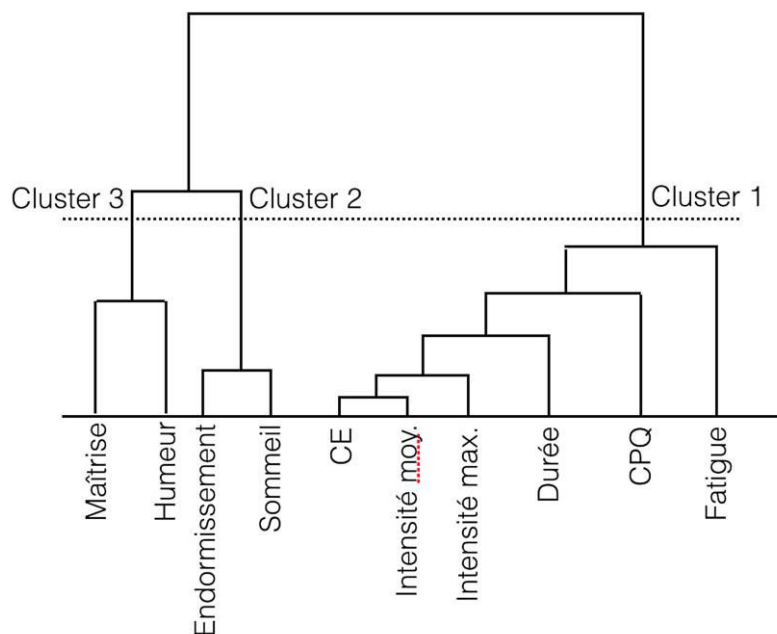


Figure 45 : Dendrogramme avec les trois clusters de la joueuse J4.

L'indicateur (1-R² ratio) indique que les variables semblent bien assorties à leurs clusters respectifs. Dans le moins cas (tableau 24), 1-R² ratio est égal à 0,77 pour la variable Fatigue du sujet J5.

	J1	J2	J3	J4	J5	J6	Moy.	EC
Charge	0,26	0,21	0,07	0,13	0,11	0,14	0,15	0,07
Durée	0,23	0,30	0,16	0,27	0,10	0,58	0,27	0,17
Intensité moy.	0,01	0,12	0,05	0,13	0,12	0,15	0,10	0,05
Intensité max.	0,12	0,11	0,14	0,19	0,17	0,12	0,14	0,03
Maîtrise	0,27	0,00	0,11	0,16	0,40	0,33	0,27	0,27
Fatigue	0,27	0,58	0,60	0,64	0,77	0,61	0,52	0,15
Endormissement	0,46	0,20	0,27	0,14	0,38	0,52	0,33	0,15
Sommeil	0,51	0,06	0,25	0,13	0,46	0,38	0,30	0,18
Humeur	0,69	0,59	0,11	0,18	0,43	0,33	0,39	0,23

Tableau 24 : Classification Hiérarchique Ascendante, Indicateur (1-R² ratio)

Les corrélations entre les clusters (tableau 25) confirment la qualité du partitionnement car il n'y a que deux clusters qui sont corrélés avec un autre.

Sujets	Clusters		r	p
J1	Clu.1	Clu.2	0,07	0,679
	Clu.1	Clu.3	0,31	0,086
	Clu.2	Clu.3	-0,14	0,428
J2	Clu.1	Clu.2	0,00	0,970
	Clu.1	Clu.3	0,05	0,757
	Clu.2	Clu.3	-0,11	0,503
J3	Clu.1	Clu.2	0,14	0,434
	Clu.1	Clu.3	-0,12	0,503
	Clu.2	Clu.3	0,25	0,159
J4	Clu.1	Clu.2	-0,11	0,492
	Clu.1	Clu.3	0,11	0,491
	Clu.2	Clu.3	0,31	0,045
J5	Clu.1	Clu.2	0,23	0,201
	Clu.1	Clu.3	-0,27	0,134
	Clu.2	Clu.3	-0,06	0,730
J6	Clu.1	Clu.2	0,06	0,714
	Clu.1	Clu.3	-0,03	0,938
	Clu.2	Clu.3	0,52	0,001

Tableau 25 : Classification Hiérarchique Ascendante, corrélations entre les clusters

Les corrélations entre les clusters des six sujets et la capacité de performance quotidienne moyenne (tableau 26) montrent une bonne corrélation avec le cluster « Charge d'entraînement » ($r=-0,67\pm 0,15$). Cela semble confirmer la relation inverse entre la CE et la CPQ et l'intérêt d'une modélisation basée sur les oscillations harmoniques amorties. Les corrélations avec les douleurs perçues (tableau 27) sont faibles ($r=0,46\pm 0,05$). Elles existent avec les trois clusters pour cinq sujets sur six.

Sujets	Clusters	R	p
J1	Clu.1	-0,80	0,000
	Clu.2	0,17	0,350
	Clu.3	-0,25	0,162
J2	Clu.1	-0,38	0,026
	Clu.2	-0,37	0,030
	Clu.3	-0,20	0,249
J3	Clu.1	-0,75	0,000
	Clu.2	-0,02	0,892
	Clu.3	0,21	0,241
J4	Clu.1	-0,68	0,000
	Clu.2	0,26	0,098
	Clu.3	-0,01	0,961
J5	Clu.1	0,32	0,066
	Clu.2	-0,18	0,316
	Clu.3	-0,70	0,000
J6	Clu.1	0,23	0,160
	Clu.2	-0,56	0,000
	Clu.3	-0,78	0,000

Tableau 26 : Classification Hiérarchique Ascendante, corrélations entre la Capacité de performance et les clusters

Sujets	Clusters	R	p
J1	Clu.1	0,26	0,157
	Clu.2	0,01	0,933
	Clu.3	0,51	0,003
J2	Clu.1	0,51	0,001
	Clu.2	0,35	0,040
	Clu.3	0,15	0,367
J3	Clu.1	-0,34	0,060
	Clu.2	-0,01	0,919
	Clu.3	0,11	0,541
J4	Clu.1	0,09	0,557
	Clu.2	0,37	0,014
	Clu.3	0,36	0,020
J5	Clu.1	0,20	0,259
	Clu.2	0,46	0,006
	Clu.3	-0,31	0,082
J6	Clu.1	0,47	0,004
	Clu.2	0,09	0,592
	Clu.3	0,16	0,335

Tableau 27 : Classification Hiérarchique Ascendante, corrélations entre le niveau de douleurs perçues et les clusters.

3.5.4- Distribution

3.5.4.1- Charge d'entraînement

Pour l'ensemble des joueuses, la CE hebdomadaire moyenne pour les deux périodes de compétitions (PC) est de 4691 ± 225 u.a. avec une CE moyenne de la deuxième PC (PC2) supérieure à la première (PC1) (4753 u.a. vs 4639 u.a., respectivement). La CE moyenne des matchs à l'extérieur est toujours supérieure à la CE moyenne des matchs à domicile que ce soit pour la PC1 et la PC2 (tableau 28).

	Préparation	Compétition 1			Compétition 2				
		Dom.	Cum.	Ext.	Cum.	Dom.	Cum.	Ext.	Cum.
Lu.	1068	564	564	617	617	605	605	824	824
Ma.	882	1048	1613	981	1597	1079	1683	1086	1910
Me.	751	453	2065	531	2128	587	2270	564	2475
Je.	1257	998	3063	857	2985	872	3143	931	3406
Ve.	1300	482	3545	351	3336	464	3607	270	3676
Sa.	948	1059	4604	1337	4673	872	4479	1331	5007
Di.	930	0	4604	0	4673	0	4479	0	5007
Total	7137	4604		4673		4479		5007	

Tableau 28 : Distribution hebdomadaire de la CE par périodes de préparation et de compétitions. Valeur moyenne quotidienne

	Charge d'entraînement		
	Moyenne	Écart-type	%
Lundi	652	117	57 %
Mardi	1048	48	91 %
Mercredi	534	59	46 %
Jeudi	914	64	80 %
Vendredi	392	100	34 %
Samedi	1150	226	100 %
Dimanche	0	0	

Tableau 29 : Charge d'entraînement moyenne quotidienne par jour de la semaine. Pourcentage exprimé en référence à la valeur maximale de la semaine (samedi, jour de match)

La veille du match, les joueuses ont cumulé en moyenne 3541 ± 146 u.a. avec un écart important entre la PC1 et la PC2 (3441 ± 147 u.a. vs 3641 ± 48 u.a., respectivement). Les valeurs maximales quotidiennes sont obtenues le jour du match à l'exception des

matchs à domicile lors de la PC2 (la séance du matin était facultative à domicile). Les CE sont alternées du lundi au samedi, jour du match (tableau 29 ; figures 46 et 47). Les CE des jours de match à l'extérieur représentent toujours la CE maximale de la semaine.

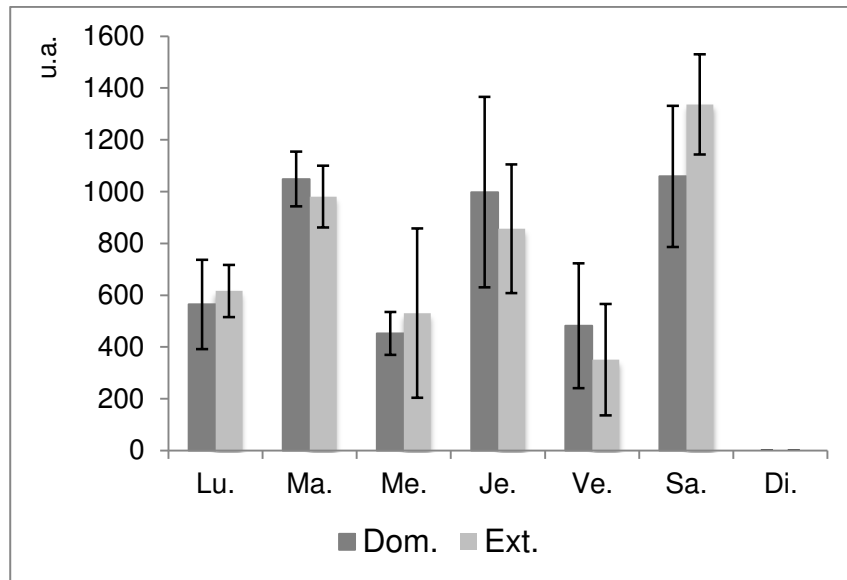


Figure 46 : Profil hebdomadaire de la CE moyenne en période de compétition 1

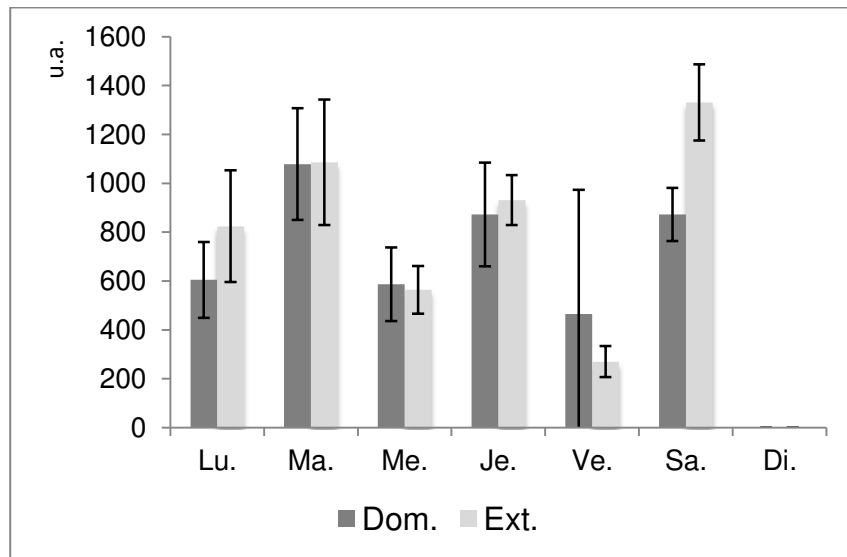


Figure 47 : Profil hebdomadaire de la CE moyenne en période de compétition 2

En dehors de la période de préparation en début de saison et de reprise avant la PC2, les volumes et les intensités moyennes sont restés relativement constants (figure 48).

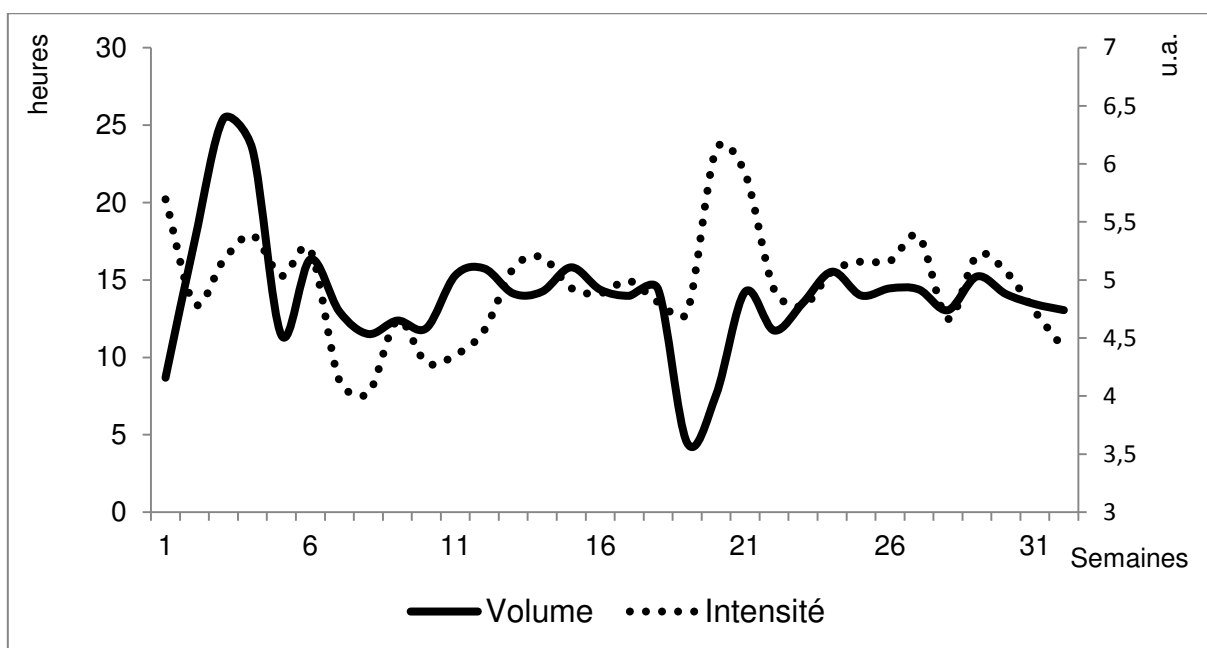


Figure 48 : Variations de l'intensité et du volume moyens hebdomadaires

3.5.4.1.1- Volume

Pour l'ensemble des joueuses, le volume hebdomadaire moyen pour les deux PC est de 937 ± 56 minutes (soit $15,6 \pm 0,9$ heures). Le volume moyen des matchs à l'extérieur est toujours supérieur au volume moyen des matchs à domicile que ce soit pour la PC1 et la PC2 (tableau 30).

	Préparation	Compétition 1			Compétition 2				
		Dom.	Cum.	Ext.	Cum.	Dom.	Cum.	Ext.	Cum.
Lu.	214	121	121	135	135	128,3	128	149,1	149
Ma.	186	213	333	209	343	206,2	335	202,0	351
Me.	166	91	424	119	462	118,8	453	108,3	459
Je.	229	197	620	182	644	189,2	642	174,9	634
Ve.	232	110	730	82	726	63,3	706	65,0	699
Sa.	196	219	949	262	988	151,0	857	254,7	954
Di.	193	0	949	0	988	0,0	857	0,0	954
Som	1415	949		988		857		954	

Tableau 30 : Distribution hebdomadaire du volume par périodes de préparation et de compétitions

La veille du match, les joueuses ont cumulé en moyenne 715 ± 15 minutes d'entraînement (soit $11,9 \pm 0,25$ heures). Le volume maximal quotidien est obtenu le jour du match à l'exception des matchs à domicile lors de PC2.

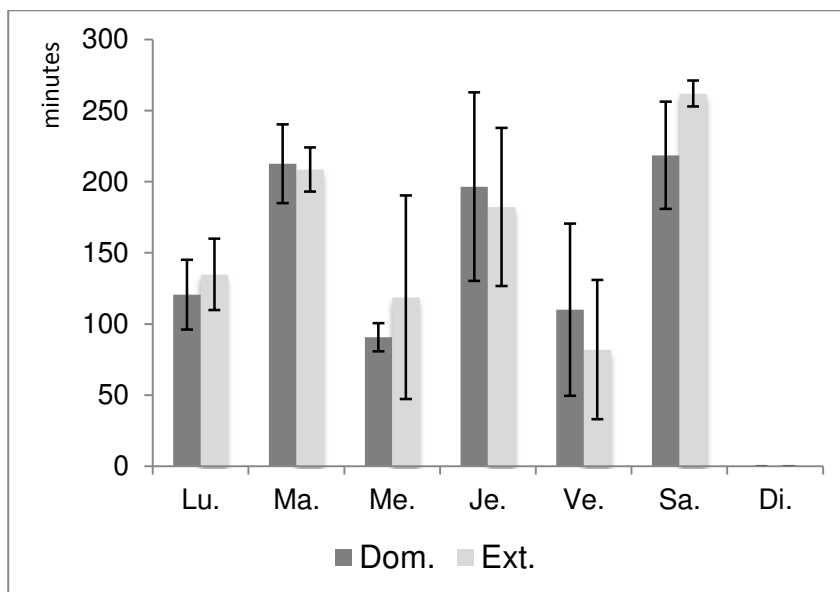


Figure 49 : Profil hebdomadaire du volume moyen en période de compétition 1

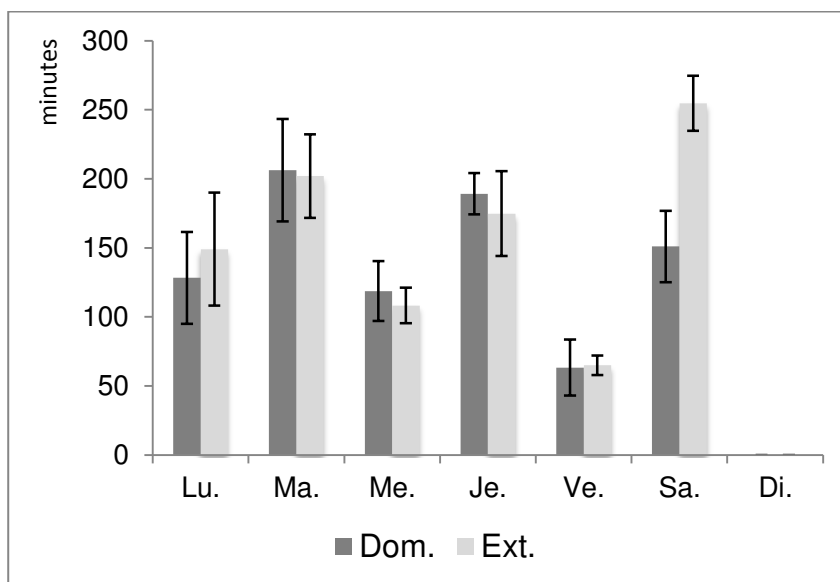


Figure 50 : Profil hebdomadaire du volume moyen en période de compétition 2

La répartition des volumes au niveau hebdomadaire est alternée. Un volume haut alterne avec un volume bas (figures 49 et 50) qui ce soit pour la période de compétition 1 ou la période de compétition 2. Cette alternance se retrouve aussi pour ce qui concerne les matchs à domicile et les matchs à l'extérieur.

3.5.4.1.2- Intensité (total et moyenne quotidiens)

Pour l'ensemble des sujets, la moyenne du total hebdomadaire d'intensité moyenne pour les deux PC est de 44 ± 3 u.a. Le total hebdomadaire des matchs à l'extérieur est toujours supérieur au total hebdomadaire des matchs à domicile que ce soit pour la PC1 et la PC2 (tableau 31).

	Préparation	Compétition 1				Compétition 2			
		Dom.	Cum.	Ext.	Cum.	Dom.	Cum.	Ext.	Cum.
Lu.	8,0	5,2	5,2	6,0	6,0	5,9	5,9	8,1	8,1
Ma.	8,7	12,4	17,6	12,3	18,2	10,2	16,1	10,6	18,7
Me.	7,2	5,2	22,8	5,4	23,7	5,3	21,5	5,4	24,1
Je.	9,9	9,0	31,8	8,3	31,9	8,8	30,3	8,7	32,8
Ve.	9,4	5,5	37,3	4,9	36,9	4,3	34,6	4,1	37,0
Sa.	6,6	7,7	45,0	9,3	46,2	5,2	39,8	9,5	46,5
Di.	7,3	0,0	45,0	0,0	46,2		39,8		46,5
	57	45		46		40		47	

Tableau 31 : Distribution hebdomadaire de l'intensité moyenne (total quotidien) par périodes de préparation et de compétitions

Les totaux quotidiens d'intensité moyenne les plus faibles sont réalisés la veille du match (le vendredi) ($4,6 \pm 0,6$ u.a.), à l'exception des matchs à domicile de la PC1 (tableau 32).

L'intensité moyenne quotidienne est de $4,8 \pm 0,4$ u.a.

	Préparation	Compétition 1				Compétition 2			
		Dom.	Cum.	Ext.	Cum.	Dom.	Cum.	Ext.	Cum.
Lu.	4,4	4,5	4	5,1	5	4,7	5	5,48	5
Ma.	4,9	5	9	5	10	4,8	10	5,27	11
Me.	3,2	4,7	14	5	15	4,5	14	5,17	16
Je.	5,4	5,1	19	4,9	20	4,8	19	5,3	21
Ve.	5,7	4,6	24	3,5	23	4,3	23	3,67	25
Sa.	4,8	4,5	28	5,3	29	4,7	28	4,9	30
Di.	4,9	0	28	0	29	0	28	0	30
Som	33	28		29		28		30	

Tableau 32 : Distribution hebdomadaire de l'intensité moyenne (moyenne quotidienne) par périodes de préparation et de compétitions

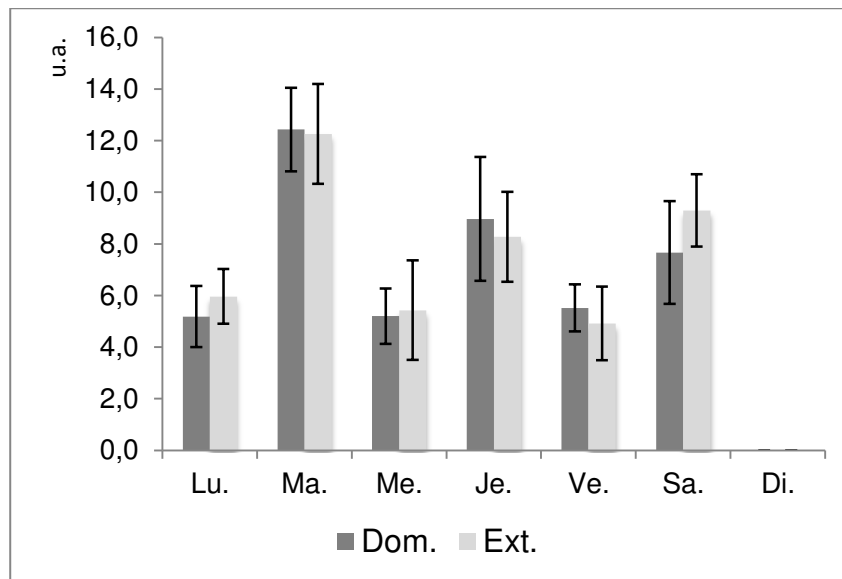


Figure 51 : Profil hebdomadaire de l'intensité moyenne en période de compétition 1

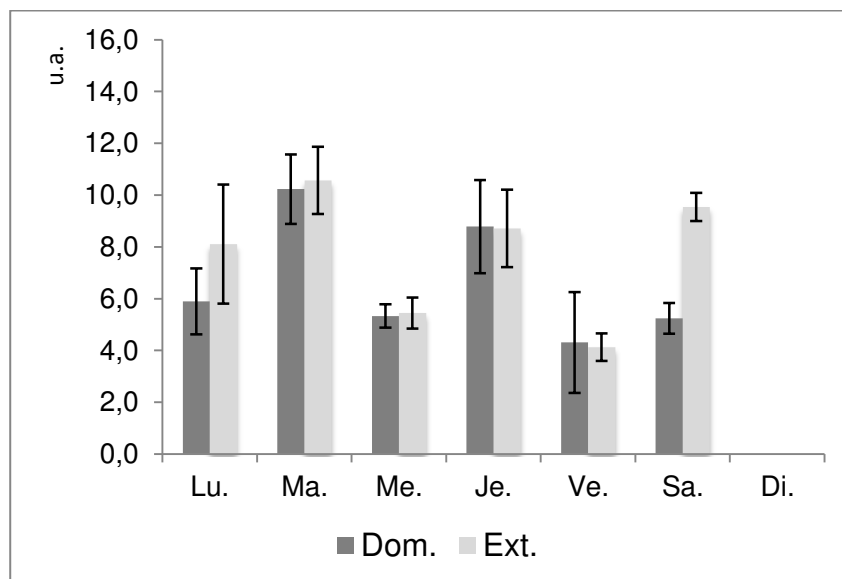


Figure 52 : Profil hebdomadaire de l'intensité moyenne en période de compétition 2

Comme pour le volume, la répartition de l'intensité moyenne au niveau hebdomadaire est alternée. Une intensité moyenne haute alterne avec une intensité moyenne basse (figures 51 et 52) que ce soit pour la période de compétition 1 ou la période de compétition 2. Cette alternance se retrouve aussi pour ce qui concerne les matchs à domicile et les matchs à l'extérieur.

3.5.5- Douleurs (localisation)

Les douleurs sont principalement situées sur le membre supérieur droit (34,5 %), essentiellement au niveau de l'épaule et sur les membres inférieurs (droit : 21,9 %, gauche : 25,9 %) (Tableau 33), principalement sur la face postérieure de la jambe (figure 53).

Localisation			Nb.	%	Nb.	%	Nb.	%
Tête	Visage		4	0,5 %	4	0,5 %		
	Cou	Devant	0	0,0 %				
		Derrière	4	0,5 %	8	1,1 %	12	1,6 %
Buste	Dos		4	0,5 %	4	0,5 %		
	Poitrine		1	0,1 %	1	0,1 %		
	Lombaires		94	12,2 %	94	12,6 %		
	Abdomen		2	0,3 %	2	0,3 %		
	Fessiers		2	0,3 %	2	0,3 %	103	13,4 %
Membre supérieur droit	Doigts	Dessous	1	0,1 %	1	0,1 %		
	Main	Dessous	28	3,6 %	28	3,7 %		
	Avant bras	Devant	1	0,1 %	1	0,1 %		
	Bras	Devant	2	0,3 %	2	0,3 %		
	Coude	Derrière	2	0,3 %				
		Devant	2	0,3 %	4	0,5 %		
	Épaule	Derrière	17	2,2 %				
		Devant	205	26,5 %	222	29,7 %	258	32,6 %
Membre inférieur droit	Hanche	Derrière	5	0,6 %				
		Devant	1	0,1 %	6	0,8 %		
	Cuisse	Derrière	29	3,8 %				
		Devant	12	1,6 %	41	5,5 %		
	Genou	Devant	5	0,6 %	5	0,7 %		
	Jambe	Derrière	76	9,8 %				
		Devant	11	1,4 %	87	11,6 %		
	Cheville	Derrière	5	0,6 %				
		Devant	4	0,5 %	9	1,2 %		
	Orteils	Dessous	8	1,0 %				
		Dessous	8	1,0 %	16	2,1 %	164	21,4 %
Membre supérieur gauche	Doigts	Dessous	15	1,9 %	15	2,0 %		
	Main	Derrière	1	0,1 %	1	0,1 %		
	Poignet	Devant	5	0,6 %	21	2,8 %	37	4,8 %
Membre inférieur gauche	Hanche	Derrière	7	0,9 %				
		Devant	7	0,9 %	14	1,9 %		
	Cuisse	Derrière	51	6,6 %				
		Devant	4	0,5 %	55	7,4 %		
	Genou	Devant	33	4,3 %	33	4,4 %		
	Jambe	Derrière	69	8,9 %				
		Devant	15	1,9 %	84	11,2 %		
	Cheville		2	0,3 %				
		Devant	3	0,4 %	5	0,7 %		
	Pied	Dessous	1	0,1 %	1	0,1 %		
	Orteils	Dessus	2	0,3 %	2	25,9 %	194	25,3 %

Tableau 33 : Localisation des douleurs perçues par les six joueuses (Nb : nombre de douleurs; % : pourcentage du total des douleurs)

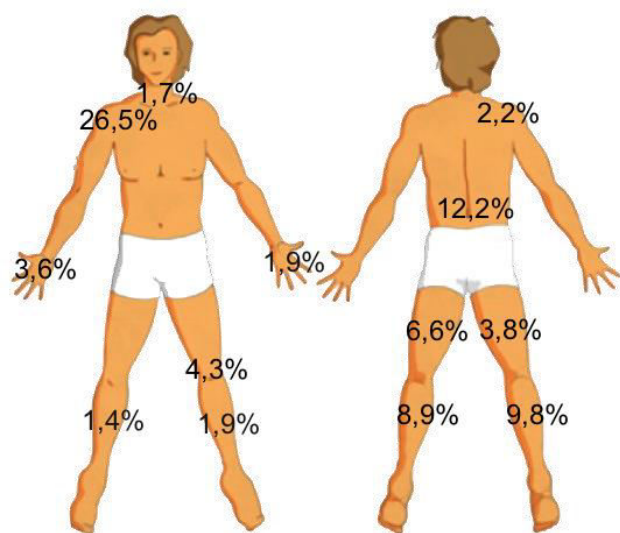


Figure 53 : Localisation des douleurs

4- DISCUSSION

« The increase in performance when training is reduced is "well known" to coaches, and there are many qualitative discussions in the sports science literature on how training should be tapered. Quantitative systems models should lend some precision to this discussion. »

Calvert et coll., 1976, page 100

Dans ce chapitre

4.1-	OUTILS DE SAISIE ET DE TRAITEMENT DES DONNEES.....	163
4.2-	CHARGE D'ENTRAINEMENT.....	166
4.3-	TESTS.....	170
4.4-	MODELISATION	171
4.5-	MARQUEURS.....	180

4.1- OUTILS DE SAISIE ET DE TRAITEMENT DES DONNEES

Au plan technique, notre objectif premier était de pouvoir collecter le plus de données sur le terrain, sans perturber le déroulement des séances. C'était la condition incontournable, et légitime, imposée par l'équipe des entraîneurs. Le temps de saisie, fortement dépendant de l'ergonomie de l'outil, devenait alors la première contrainte. Les principes communément admis dans la construction des interfaces homme-machine qui sont que le temps de saisie ne doit pas dépasser quelques dizaines de secondes et qu'on ne doit pas cliquer plus de trois fois pour accéder à un item semblent donc avoir été correctement mis en œuvre.

Pour répondre à l'exigence de rapidité de saisie, il n'est pas pertinent d'utiliser un clavier physique et encore moins un clavier virtuel dont les touches sont souvent minuscules et génèrent des erreurs de saisie. L'usage de calendrier, de listes déroulantes et de curseur à déplacer se révèle à l'usage être plus fonctionnel. Une iconographie adaptée permet ensuite un repérage rapide des éléments, notamment du sens vers lequel la joueuse peut déplacer le curseur.

L'intérêt majeur d'une saisie électronique est sa capacité de stockage et les possibilités de transfert et d'analyse rapide qui en découlent, mais aussi la confidentialité lors de la saisie. Personne ne peut voir les déplacements de curseur de la joueuse, ce qui nous semble favoriser une plus grande sincérité. Dans notre étude, répondre à toutes les questions durait 42 ± 21 secondes. Les durées les plus longues correspondaient aux joueuses qui saisissaient une ou plusieurs douleurs.

Au mois de septembre, plusieurs joueuses ont été convoquées en sélection nationale. Il devenait alors indispensable de développer un site Web spécifique (www.trainingloadpro.com) accessible de tous les endroits du monde, pour peu qu'il y ait une connexion téléphone ou internet.

Nous avons développé le site Web adaptatif (RWD⁷³) pour qu'il réponde à toutes les contraintes techniques liées aux outils de saisie et à leur système

⁷³ RWD : responsive web design; confort visuel qui permet de ne pas avoir recours au défilement horizontal ou au zoom avant/arrière sur les appareils tactiles, manipulations qui peuvent parfois dégrader l'expérience utilisateur.

d'exploitation, mais aussi aux différents navigateurs dont les règles d'affichage ne sont pas toujours standardisées. Les langages JQuery Mobile, HTML5, CSS3 et SQL et les API⁷⁴ Google Chart sont dans ce cas incontournables pour gérer les interfaces et des données. Pour des raisons de concurrence commerciale, certaines grandes entreprises n'adoptent pas les formats de leurs concurrents. C'est le cas pour Apple dont les iPhone et iPad ne gèrent pas la technologie Flash d'Adobe.

Une saisie rendue possible hors des lieux habituels d'entraînement permet de continuer à quantifier la CE, car jusqu'à présent nous n'avions que peu d'informations à ce sujet. Mais elle permet aussi un retour presque simultané d'informations profitables (Piacentini & Meeusen, 2014). Chaque saisie fait l'objet d'un stockage en base de données sur serveur, mais aussi de l'envoi d'un mail avec en pièce jointe un fichier XML comportant toutes les données.

Une évolution majeure nous semble devoir être apportée à l'interface. Les marqueurs apparaissent en effet toujours dans le même ordre, et les échelles visuelles sont toujours dans le même sens. L'intérêt en termes de rapidité de saisie est indiscutable puisque de séance en séance les joueuses peuvent retenir l'ordre et ainsi saisir plus vite. Mais cela peut aussi être une limite, car les joueuses ne prêtent plus suffisamment attention au marqueur affiché à l'écran. Rendre aléatoire l'ordre d'apparition des marqueurs ainsi que le sens des échelles aléatoires n'est pas complexe informatiquement et imposerait aux joueuses plus de vigilance dans la cotation. La contrepartie sera une augmentation du temps de saisie.

Cependant les échelles visuelles analogiques sont essentiellement utilisées pour la perception de l'effort et de la douleur (Huskisson, E.C., 1974 ; Scott & Huskisson, 1979 ; Bodian et coll., 2001) pour lesquelles elles ont fait l'objet de nombreuses études scientifiques. Leurs utilisations avec d'autres marqueurs nécessitent de vérifier leur reproductibilité et leur validité.

Les icônes placées aux extrémités des échelles visuelles doivent être choisies avec précaution. L'utilisation d'un visage triste et d'un visage heureux peut ne pas être appropriée pour l'ensemble des marqueurs. Il serait sans doute préférable d'utiliser une

⁷⁴ API : Application Programming Interface; ensemble normalisé de classes, de méthodes ou de fonctions qui sert de façade par laquelle un logiciel offre des services à d'autres logiciels

flèche montante et une flèche descendante.

Pour l'entraîneur, c'est l'analyse des données, mais surtout leur représentation le plus souvent sous forme graphique, qui est très importante. L'ergonomie du logiciel, comme celle de l'outil de saisie pour la joueuse, est donc importante pour son utilisation réelle et régulière (Halson S.L., 2014). Le logiciel que nous avons développé ne produit pas une analyse détaillée et discutée au regard des principes de l'entraînement. Aucune machine ne peut à l'heure actuelle relever ce défi. Il organise les données pour rendre leurs lectures et analyses plus lisibles. Le choix d'afficher les graphiques dans des fenêtres séparées répond à cette exigence. Chaque graphique est également configurable en termes de types de graphique, et d'affichage. Les graphiques et les données tabulaires sont exportables pour être par exemple dans des logiciels dédiés (diaporama, statistiques).

Bien que les quantifications quotidiennes et hebdomadaires soient les plus couramment rencontrées, car faisant référence pour cette dernière à la notion de microcycle, le caractère irrégulier des compétitions impose à terme de pouvoir personnaliser les dates de début et de fin de période de microcycle qui sont actuellement définis par défaut sur 7 jours.

Une évolution importante serait également de permettre la saisie détaillée des contenus des séances (période, objectifs, dominantes...) pour permettre une analyse plus précise et donc d'envisager une interface spécifiquement dédiée à l'équipe technique. Halson S.L. (2014) note qu'une surveillance appropriée de la charge d'entraînement peut fournir des informations importantes pour les athlètes et les entraîneurs ; Toutefois, les systèmes de surveillance doivent être intuitifs, fournir des données et des analyses efficaces, et permettre de générer des feedbacks, des rapports simples, mais scientifiquement valables. Le suivi des sportifs et de marqueurs subjectifs en ligne est un système pertinent. Piacentini & Meeusen (2014) ont montré sa validité dans le cadre du surmenage et du surentraînement avec une athlète. Cela permet d'améliorer le processus de gestion de la charge CE.

4.2- CHARGE D'ENTRAÎNEMENT

4.2.1- Niveau

Dans notre étude, les CE moyennes sont de 7137 ± 444 u.a. en période de préparation (PP) et de 4229 ± 617 u.a. en période de compétition (PC) avec une valeur hebdomadaire record de 8818 u.a. et de 5854 u.a., respectivement. Ces valeurs sont très importantes au regard de la littérature où l'on note 4403 ± 1142 u.a. chez des jeunes joueurs de tennis (Malisoux et coll., 2013) ou 3475 ± 249 u.a. chez de jeunes footballeurs (Impellizeri et coll., 2004). Manzi et coll. (2010) notent des valeurs de 3334 ± 256 u.a. pour une semaine sans match, 2928 ± 303 u.a. et 2791 ± 239 u.a. pour une semaine avec un match et deux matchs respectivement, chez huit basketteurs professionnels italiens. Gabbett & Jenkins (2011) mentionnent une valeur record de 4000 u.a. en PC pour 79 rugbymen professionnels australiens et Pigott B. (2009) trouve une CE moyenne d'avant saison de 2945 ± 922 u.a. avec un pic à 4499 u.a. également chez des joueurs de rugby masculins.

Malgré ce très haut niveau de CE, il est intéressant de noter qu'aucune joueuse n'a manqué de journée d'entraînement, ce qui, au regard du niveau et des variations des marqueurs non spécifiques, peut nous laisser penser qu'il semblait possible d'augmenter significativement le niveau de la CE. Le volley-ball n'étant pas un sport de contact, il n'est pas surprenant que l'on puisse atteindre de plus hautes valeurs de la CE qu'au rugby (Gabbett & Jenkins, 2011). Les accidents traumatologiques ont une incidence sur les indisponibilités à l'entraînement ainsi que sur leurs contenus.

4.2.2- Volume et intensité

Contrairement à la période de préparation (PP) où nous constatons que le volume est le principal facteur de variation de la charge d'entraînement (figure 50), en période de compétition (PC), l'intensité et le volume se suivent de manière presque linéaire et monotone (figure 35).

Brown & Greenwood (2005) précisent pourtant que le volume et l'intensité sont deux variables qui doivent être inversement liées quel que soit le niveau de structuration

du plan d'entraînement (microcycle, mésocycle, macrocycle) et que c'est un facteur clé d'une périodisation efficace.

Issurin V.B. (2008 et 2010) note également que tenter de développer plusieurs compétences simultanément induit une moindre efficacité de l'entraînement, car le corps ne peut s'adapter simultanément à tous les stimuli en même temps. Observations confirmées par Stone et coll. (1982 et 1999) dans le cadre de l'entraînement de la force. Les périodes où les variations d'intensité et de volume augmentent simultanément semblent potentiellement plus accidentogènes que les périodes où l'intensité et le volume évoluent dans des sens différents. D'autant plus si ces augmentations se prolongent pendant plusieurs semaines. Ne pas différencier volume et intensité constitue une limite importante de toutes les modélisations et méthodes de quantification de la CE. Complexe à réaliser, elle contribue selon nous à développer le suivi de plusieurs marqueurs et d'autres types d'analyses statistiques.

4.2.3- Distribution hebdomadaire de la CE

Pour les PC⁷⁵, il se dégage une structuration hebdomadaire type de distribution de la CE (figures 45 et 46). Chaque journée de forte CE est précédée d'une journée de CE moyenne ou basse.

Que ce soit pour les matchs à domicile ou les matchs à l'extérieur, les mardis (J-4) et jeudis (J-2) sont les jours de plus forte CE (1048±48 u.a. et 914±64 u.a. respectivement), encadrés par les jours de plus faibles CE (652±117 u.a., 534±59 u.a. et 392±100 u.a. pour les lundis, mercredis (J-3) et vendredis (J-1), respectivement).

Cette structuration en deux temps est peu fréquente dans les sports professionnels. Beaucoup d'équipes adoptent celle mise en évidence par Manzi et coll. (2010) avec des basketteurs professionnels, et constatée par Impellizeri et coll. (2004) chez de jeunes footballeurs, c'est-à-dire une mini-période d'affûtage de décharge pendant les trois jours précédents le match.

L'hypothèse de l'équipe technique était ici d'éviter la trop grande accumulation de fatigue provoquée par une programmation de type pyramidale. Un allègement la

⁷⁵ PC : période de compétition

veille (J-1) mais surtout en milieu de semaine (J-3) devant favoriser les processus de récupération et permettre d'augmenter l'intensité des entraînements des deux jours précédents le match. Moreira et coll. (2013) ont montré que la réduction de la CE avant les compétitions de futsal permettait aux joueurs de conserver leur capacité à s'entraîner et à être compétitifs.

Il n'est pas surprenant de constater que le jour précédent les matchs à l'extérieur la CE est inférieure au jour précédent les matchs à domicile (351 vs 482 u.a. en PC1, 270 vs 464 u.a. en PC2). Nous mesurons ici les conséquences sur la CE du déplacement vers le lieu de compétition, presque toujours réalisé la veille. Les budgets des clubs de volley-ball professionnels ne permettent pas un déplacement en avion le jour même du match. Les déplacements se font en train ou en voiture la veille avec une nuitée.

Cela se traduit également par une CE du lundi des matchs à domicile toujours inférieure à la CE du lundi des matchs à l'extérieur (564 vs 617 u.a. en PC1, 605 vs 824 u.a. en PC2). Les matchs à domicile et à l'extérieur alternant presque systématiquement à quelques exceptions près.

Le plus surprenant est la très grande supériorité de la CE du jour du match à l'extérieur par rapport à la CE du jour du match à domicile (1059 vs 1337 u.a., soit +26 %, pour la PC1, et 872 vs 1331 u.a., soit +53 %, pour la PC2). C'est la conséquence essentielle d'une courte séance placée le matin même du match, que toutes les joueuses font lorsqu'elles sont en déplacement, mais qui reste facultative pour les matchs à domicile et à laquelle très peu de joueuses participent.

Les résultats des matchs en cinq sets à l'extérieur peuvent laisser penser que cette séance le matin du match à l'extérieur est préjudiciable au résultat. Les clusters de la classification hiérarchique ascendante n'étant pas corrélés entre eux, il semble qu'on ne puisse attribuer ces mauvaises performances au sommeil la veille du match. L'équipe comptabilise deux victoires pour six défaites, avec des scores serrés au cinquième set pour quatre d'entre elles (17-15, 16-14, 15-13, 15-11). La difficulté est de savoir si c'est la conséquence du déplacement, de la nuit à l'hôtel, de la séance du matin ou d'une combinaison de l'ensemble. L'écart de qualité de sommeil entre les nuits des matchs à domicile et des matchs à l'extérieur est de $0,5 \pm 0,45$ u.a. (3,45 vs 3,97 u.a., respectivement). La qualité de la nuit à l'hôtel, et indirectement de l'influence du

déplacement, semblent pouvoir donc être exclues des causes probables du surcroît de défaites pour les matchs en cinq sets. Juliff et coll. (2014) notent que le principal problème de sommeil la veille d'une compétition est lié à un mauvais endormissement dû à la nervosité et aux pensées sur la compétition (classement de l'équipe et les enjeux de la rencontre, Marcellino et coll., 2013), mais que cela n'a que très peu d'influence sur la performance.

Cette surcharge semble s'expliquer par un volume plus important les jours de matchs à l'extérieur, plus particulièrement en PC2 (figures 48 et 49). Nous pouvons en effet constater que l'intensité moyenne des séances ne varie que très peu durant le championnat, exception des veilles de matchs pour la PC2 où elle est plus basse (figures 51 et 52).

Il serait peut-être préférable de transférer cette séance au lundi suivant les matchs à domicile et d'augmenter la CE en début de semaine. En effet, aucune journée de la semaine d'entraînement type ne voit les joueuses réaliser une CE cumulée supérieure à celle du match.

La valeur la plus forte est obtenue le mardi (91 % de la valeur maximale de la semaine qu'est le match), pour ensuite baisser à 80 % le jeudi et 57 % le lundi. La monotonie ne se situe pas au niveau de la fréquence de la CE, ni du volume, mais essentiellement au niveau de l'intensité. C'est un paramètre qui devrait varier plus, et sur une plus grande amplitude, car il est très important dans l'amélioration des performances (Laursen & Jenkins, 2002 ; Mujika et coll., 1995). Bien que pour le sportif entraîné, Mujika et coll. (1995) ne notent aucune relation significative entre la fréquence d'entraînement et le niveau de performance, Foster C. (1998) note qu'une forte monotonie a des effets négatifs sur la performance. Lorsqu'il conserve une même CE élevée, la répartition quatre séances difficiles, un jour de repos et deux jours de récupération sont mieux tolérés que six jours d'entraînement avec un jour de repos. Les simulations faites avec notre modélisation (figures 21, 23 et 24) semblent confirmer ce constat.

Cela permettrait de réduire le volume à l'approche du match. Réduction qui a été montrée dans une méta-analyse (Bosquet et coll., 2007) comme étant la variable la plus influente sur le niveau de performance (figure 25).

4.3- TESTS

Le calibrage individuel du modèle nécessite que les joueuses réalisent un nombre suffisant de répétitions d'un ou plusieurs tests (Hellard et coll., 2006). Toute la difficulté réside dans le choix des tests compte tenu des contraintes du milieu professionnel et des caractéristiques essentielles de l'activité.

Il n'était donc pas envisageable de répéter chaque semaine un test d'évaluation indirecte de l'aptitude aérobie qui pouvait générer une fatigue préjudiciable au bon déroulement de la séance, mais aussi parce qu'il peut influencer négativement le niveau de motivation des joueuses.

Les performances à haut niveau sont également très influencées par les capacités physiques des joueurs, notamment la vitesse et la capacité à sauter (Martin-Matillas et coll., 2013). Le saut vertical est impliqué dans la plupart des gestes et est un facteur discriminant à haut niveau (Ziv & Lidor, 2010a). Bobbert et coll. (2011) ont aussi montré que (i) la capacité à sauter était corrélée avec la fatigue et (ii) que la baisse de performance était partiellement due à une mauvaise adéquation entre le contrôle neuromusculaire et les propriétés musculosquelettiques.

Considérant les critères de validité et de fiabilité, il nous a semblé plus pertinent de supprimer la consigne "*Posez les mains sur les hanches*". Les déplacements horizontaux constatés lors des premiers essais faussaient les valeurs de hauteur atteinte. La quasi-totalité des filles retombait soit en dehors des barres de l'Optojump soit quarante à cinquante centimètres à côté de la zone d'impulsion. Cela nous aurait amenés à exclure les résultats des premiers tests pour supprimer l'effet d'apprentissage. Leur laisser utiliser leurs bras, comme elles peuvent le faire durant les séances depuis plusieurs années avait l'intérêt de supprimer les écarts de distance entre zone d'impulsion et zone de réception, et ainsi d'améliorer la standardisation du test. La spécialisation est très importante à ce niveau de pratique. Marques et coll. (2009) précisent ainsi qu'il est important de le prendre en compte dans le choix des tests et des programmes d'entraînement. Comme joueuse professionnelle, elles font preuve d'une grande compétence à répéter des mouvements très proches de leurs gestes techniques habituels et nous pouvons légitimement postuler que les variations de hauteur ne sont pas la conséquence première d'une maîtrise technique améliorée au fur et à mesure du

passage des tests, mais l'expression de la capacité de performance du moment. Les très faibles variations individuelles intratests (CV:1,5 %) semblent confirmer ce choix. Dans notre étude, les tests de CMJ avec et sans élan sont significativement très corrélés avec la capacité de performance quotidienne (figure 31).

Si nous considérons que la performance au volley-ball sollicite majoritairement la capacité à conserver un niveau élevé de puissance mécanique, les variations de résultats des tests de CMJ pourraient alors être associées aux dégradations de la fonction neuromusculaire (Twist & Highton, 2013). Pour des raisons de facilité (les séances tactiques se déroulent en fin de semaine à l'approche du match), les tests ont été très majoritairement réalisés en début de semaine (c.-à-d. le mardi matin). Les joueuses n'avaient pratiqué en moyenne qu'une séance durant les quarante-huit heures précédant les tests, celle du lundi après midi, minimisant ainsi les effets de la fatigue aiguë. Les influences relatives de la fatigue périphérique (c.-à-d., entre autres des changements métaboliques au niveau musculaire), et de la fatigue centrale (c.-à-d., altération de la commande motrice) sur la performance ne peuvent cependant être précisées.

Le « Standing spike test » (Palao & Valades, 2012), ou test du service en appui, semble être un test alternatif ou complémentaire valide pour suivre durant toute l'année le niveau de performance des volleyeuses. Mesurée avec un radar, la vitesse du ballon pourrait être l'expression du niveau de fatigue des membres supérieurs de la joueuse.

4.4- MODELISATION

À notre connaissance, notre étude est la première à présenter un modèle des effets de l'entraînement sur la CPQ basé sur les oscillations sinusoïdales amorties. Cette modélisation considère la CPQ cumulée comme (i) la somme des CPQ différées des entraînements successifs précédents ainsi que des jours de repos, et (ii) comme un processus non linéaire et non monotone sur toute la saison. Les effets positifs et négatifs de l'entraînement provoquent des oscillations apparentes de performance qui rendent attrayante la fonction sinus. En conséquence, la CPQ peut être considérée comme l'expression d'un processus d'accumulation et de dissipation de la fatigue strictement individuel induit par les séances d'entraînement, modulée par les temps de récupération.

Bien que de nombreuses recherches aient étudié les exigences en matchs et les

profils des joueuses de volley-ball (Martin-Matillas et coll., 2013 ; Ziv & Lidor, 2010b), les statistiques individuelles et collectives techniques et tactiques semblent difficiles à utiliser et ne semblent pas être des marqueurs fiables, sensibles et reproductibles de la capacité de performance. Marcellino et coll. (2011) ont montré ainsi que les joueurs de volley-ball faisaient des choix plus risqués pendant les phases de jeu indécises que lors des phases de jeu où ils estimaient avoir un avantage technique ou tactique avéré. Les comportements stratégiques semblent très influencés par les perceptions des joueurs lors des oppositions individuelles, mais aussi par l'interprétation du score ainsi que le moment du match où ils réalisent leurs gestes techniques. Les statistiques de matchs ne semblent donc pas être des marqueurs pertinents de la capacité de performances des joueurs. Un joueur peut avoir une capacité de performance élevée, mais avoir des statistiques de matchs médiocres, car son adversaire direct lui est nettement supérieur.

Les corrélations positives significatives entre la CPQ modélisée et les tests de CMJ sans et avec élan suggèrent que les variations de CPQ peuvent être modélisées par les oscillations harmoniques amorties qui peuvent aussi bien mesurer les augmentations que les baisses de performances. Nous obtenons une forte corrélation significative entre les valeurs de l'amortissement θ et l'âge des joueuses ($\rho=0,90$, $p<0,01$ et $\rho=0,88$, $p<0,04$, respectivement). Complémentairement, le paramètre T voit également ses valeurs être proches de la valeur de la constante de fatigue τ_3 du modèle originel de Banister et coll. (1975) (c.-à-d., 15 jours). Nous obtenons également une forte corrélation significative entre la paramètre T et l'âge ($\rho=0,81$, $p<0,05$ et $\rho=0,88$, $p<0,04$, respectivement).

Notre modélisation de la CPQ reflèterait donc les effets cumulés différés des charges d'entraînement des jours précédents. Ces variations dans le temps de la CPQ semblent être proches de certains rythmes biologiques. Il est maintenant bien établi que les systèmes cardio-circulatoires, ventilatoires, métaboliques et hormonaux au repos ou lors d'exercices de type aérobie présentent des rythmes circadiens caractéristiques (Souissi & Davenne, 2004). mais ces variations peuvent aussi être une illustration du concept de fractal⁷⁶ pour lequel les détails ont les mêmes caractéristiques de l'ensemble. Toutefois, la validité physiologique de notre modélisation nécessite d'être clairement expliquée.

⁷⁶ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fractale>

Les valeurs du paramètre d'amortissement θ et de période T sont similaires à celles mentionnées dans la littérature scientifique. Nos valeurs d'amortissement θ sont similaires aux valeurs basses du paramètre de fatigue τ_2 du modèle de Banister et coll. (1975) : 2 ± 2 jours chez huit sujets non entraînés (Busso et coll., 1991) et 4 et 6 jours pour deux cyclistes amateurs (Busso et coll., 1997). Nos valeurs de période T sont également similaires aux valeurs hautes du paramètre de fatigue τ_2 (11 jours chez deux sujets non entraînés (Morton et coll., 1990), 13 ± 3 jours chez six sujets non entraînés (Busso et coll., 1997), et 12 ± 6 jours chez 18 nageurs de haut niveau (Mujika et coll., 1995). Cela semble démontrer la dépendance de la performance à la fatigue, telle qu'elle peut être modélisée par différents auteurs, mais aussi confirmer l'importance des effets différés. Cela valide la nécessité de recalculer les paramètres comme ont pu le montrer Busso et coll. (1997) ou d'intégrer les effets pondérés des séances précédentes comme peut le faire notre modélisation.

Les similitudes entre les valeurs d'amortissement de notre modélisation θ et le paramètre de fatigue τ_2 du modèle de Banister et coll. (1975) suggèrent que la CPQ semble très dépendante du niveau de fatigue. Il n'y a en outre aucune corrélation avec le paramètre de fitness τ_1 du modèle de Banister et coll. (1975) (38 ± 9 jours (Busso et coll., 1991) et 60 jours (Busso et coll., 1997)). Cela pourrait laisser penser que la CPQ est inversement liée au niveau de fatigue et qu'elle ne correspond pas à la différence entre les paramètres de fitness et de fatigue, comme peuvent le mentionner Banister et coll. (1975). En utilisant le modèle de Banister et coll. (1975), Chalencon et coll. (2012) mentionnent que la fatigue se dissipe plus vite que l'aptitude quand la charge d'entraînement est réduite.

La CPQ serait l'expression de la variation du niveau de fatigue qui pourrait être lié à l'entraînement mais aussi aux conséquences d'événements personnels (par exemples, à un sommeil perturbé par les pleurs d'un bébé ou à des habitudes de vie incompatibles avec une récupération optimale).

Cela semble donc confirmer que la CPQ est très dépendante de l'amplitude de la charge d'entraînement, ce qui renforce la nécessité de la quantifier, mais aussi qu'elle est multifactorielle. Cela peut être mis en perspective avec les résultats des recherches de Hellard et coll. (2013) avec des nageurs de haut niveau qui montrait que durant leur carrière, de meilleures performances sont obtenues lorsque les charges d'entraînement

sont augmentées et franchement réduites durant la période d'affûtage. Mais aussi avec les études de Hooper et coll. (1995) et Hooper & McKinnon, 1995 qui mettent en évidence l'intérêt de suivre la fatigue perçue et le bien-être.

La structure itérative du calcul suggère que :

1) la CPQ semble être la somme des effets cumulés des jours d'entraînement précédents, influencés par les jours de repos (figure 23) ;

2) les variations de performances chez le sportif de haut niveau sont non linéaires et non monotones, avec une période d'oscillation relativement courte.

Le caractère cyclique des variations de la CPQ implique donc que les entraîneurs portent attention aussi bien aux périodes d'entraînement qu'aux périodes et aux processus de récupération (c.-à-d., les périodes de diminution de la charge d'entraînement) (García-Pallarés et coll., 2009).

Le caractère ondulatoire peut être discuté au regard des résultats de Busso et coll. (2002) sur les effets de la fréquence des entraînements sur la performance. Des précédentes études (Mujika et coll., 1995 ; Busso et coll., 2002) ont montré que les relations entraînement/récupération étaient un facteur pondérateur des variations de performances. Les bonnes corrélations et le haut niveau d'ajustement observés dans notre étude (légèrement meilleure que celles du modèle de Banister et coll. (1975) suggèrent que le concept de fatigue, bien que difficile à définir, est très important, non seulement comme un marqueur précurseur de la capacité de performance, mais aussi comme un marqueur des limites qu'on ne doit pas dépasser trop souvent et trop longtemps avec comme risque le surmenage et le surentraînement. Il est cependant difficile de savoir si c'est une fatigue à court terme ou moyen terme, comme Calvert et coll. (1976) avait tenté de le modéliser dans sa recherche avec une équation à trois paramètres.

Les valeurs de la période T s'échantillonnent de 7 à 13 jours. Cela peut être mis en perspective avec les méta-analyses sur l'affûtage de Mujika & Padilla (2003) et Bosquet et coll. (2007), dans lesquelles 8 et 15 jours semblent être les limites entre l'influence positive de la dissipation de la fatigue et l'influence négative du sous entraînement. Un affûtage de deux semaines durant lequel le volume est réduit

exponentiellement de 41 à 60 % sans réduction de l'intensité ou de la fréquence semble être la stratégie la plus efficace pour maximiser les gains de performance.

Il est intéressant de noter que des valeurs de 7 à 13 jours sont issues d'études dans les sports individuels et ne semblent pas adaptées aux sports collectifs. Le calendrier des compétitions (championnat, Coupe de France, Coupe de Ligue, Coupe d'Europe et sélection nationale) peut amener les sportifs à jouer tous les trois jours sur des périodes de plusieurs semaines. Ces stratégies d'affûtage ne semblent donc pas pouvoir permettre aux sportifs d'être au maximum de leurs capacités. La notion de zone optimale de CE semblerait ici plus appropriée.

Les résultats de notre étude montrent qu'au sein de la même équipe, les joueuses réagissent différemment à des charges d'entraînement en apparence semblables. Les corrélations entre le paramètre de période T , le paramètre d'amortissement θ et l'âge pourraient être dues aux évolutions physiologiques liées à l'âge. En natation, Tanaka & Seals (1997) placent le pic de performance entre 25 et 40 ans pour les hommes et entre 30 et 35 ans pour les femmes, ces périodes variant suivant les durées de courses. Les temps au 1500 mètres nage libre sont meilleurs pour les âges les plus jeunes de ces périodes aussi bien pour les hommes que pour les femmes.

L'âge influence les fonctions musculaires de manière importante pour atteindre un maximum entre 30 et 35 ans (Sultana et coll., 2008). Le déclin serait en relation avec la perte de masse musculaire et ne serait pas lié à la détérioration des propriétés contractiles du muscle. La sarcopénie serait la conséquence d'une diminution du nombre de fibres musculaires due à la perte d'unités motrices fonctionnelles pour être remplacé par du tissu graisseux et conjonctif. À partir de 30/35 ans, la durée de la réponse motrice augmenterait et il y aurait une altération de la proprioception (Gros Lambert & Mahon, 2006).

Dans les sauts verticaux, Floria & Harrison (2012) montrent que les jeunes filles profitent de l'action des bras différemment des jeunes femmes en améliorant leur hauteur au décollage alors que les adultes l'améliorent en augmentant la hauteur de vol. Donato et coll. (2003) montrent également que (i) le taux de régression dans les performances en natation dans les épreuves de longues durées est plus important que dans les épreuves de courtes durées (suggérant une faible perte de la puissance

musculaire anaérobie avec l'âge, comparée à l'endurance cardio-vasculaire) et (ii) que la variabilité de ce déclin augmente de manière significative avec l'âge.

Berthelot et coll. (2012) considèrent que ces processus ne dépendent ni du sport, ni du sexe, ni des conditions environnementales, mais sont liés aux effets généraux du vieillissement, qui peut débuter dès la deuxième décennie pour certaines hormones ou pour la consommation d'oxygène. Il est cependant important de noter que dans notre étude l'écart-type de l'âge des joueuses est relativement faible (2,4 ans).

La nécessité d'individualiser les paramètres de notre modélisation renforce l'hypothèse selon laquelle les adaptations à l'entraînement sont individuelles. Bosquet et coll. (2007) notent d'ailleurs que des designs d'affûtage individuels permettent d'augmenter les gains de performance. Ces auteurs ont également montré que les gains de performance sont fortement dépendants du temps. Cet argument contribue à la nécessité de structurer les plans d'entraînement, car leurs influences respectives et combinées font qu'une même séance réalisée à différents moments de la saison ne produira pas le même niveau de fatigue (et par conséquent d'adaptations) chez toutes les joueuses (Hooper et coll., 1995 ; Hooper & McKinnon, 1995).

C'est un aspect important qui est pris en compte dans notre modélisation. Ceci est d'autant plus marqué lorsque le nombre d'années de pratique à haut niveau augmente (Granados et coll., 2013). Hellard et coll. (2013) suggèrent, qu'au cours de la carrière d'un sportif de haut niveau, les plans d'entraînement changent, notamment par une augmentation de la charge d'entraînement, mais que cela impose d'être adapté à chaque sportif. Les bonnes corrélations entre les deux paramètres de notre modélisation et l'âge des joueuses semblent montrer que l'expertise (c.-à-d. le nombre d'années de pratique à haut niveau) a une influence majeure sur la CPQ (Granados et coll., 2013) et que cela pourrait refléter les variations de performance musculaire et de fatigabilité.

La MSE de toutes les joueuses ($0,7 \pm 0,3$ cm ; c.-à-d. $1,69 \% \pm 0,68 \%$ du CMJ moyen) est proche des valeurs rapportées par Mujika et al. (1995, 1996) et Mujika, I. (1998) avec le modèle de Banister et coll. (1975) ($1,05 \pm 0,63 \%$). Notre modélisation s'avère être cependant légèrement plus précise que celle de Banister et coll. (1975) (MSE de 0,3 à 1,2 cm et de 0,6 à 1,6 cm, respectivement), dont il convient de noter toutefois la bonne qualité d'ajustement. Avec six étudiants, non sédentaires mais actifs,

sur deux périodes de six et neuf semaines, Pfeiffer M. (2008) montre un écart moyen relatif entre les performances prédites et les performances réelles de 2,78 % (modèle de Banister et coll., 1975) et de 2,48 % (modèle PerPot). Cela semble montrer la pertinence de notre approche basée sur les oscillations harmoniques amorties mais aussi confirmer que la CPQ est dépendante, dans des proportions variables, des jours d'entraînement et de repos précédents.

La principale découverte est que la CPQ ne semble pas être la différence entre l'aptitude et la fatigue à l'instar du modèle de Banister et coll. (1975) ou la différence entre un délai de contrainte ("strain delay") (c.-à-d., influences négatives) et un délai de réponse ("response delay") (c.-à-d., influences positives) (Perl J., 2000, 2001a et 2001b). Selon notre modélisation, c'est l'organisation des CE et des jours de repos qui produit un effet sur la CPQ. Si la périodisation est considérée comme l'organisation des CE dans le temps, (i) la production d'un niveau optimal de fatigue durant les jours, les semaines, les périodes de préparation et (ii) la diminution de la fatigue les jours, les semaines avant la compétition sont alors des moments clés destinés à synchroniser les pics de CPQ avec les compétitions (figures 23, 24 et 25, pages 110, 111 et 112).

En sports collectifs, les joueuses pratiquent en moyenne un match par semaine et ont une journée de repos (Manzi et coll., 2010). En ce sens notre modélisation semble également pouvoir mettre en évidence les limites de CE à ne pas dépasser pour atteindre une CPQ optimale. En effet, toute augmentation de CE une journée devra donc être compensée par une baisse un autre jour. A défaut, le pic de forme sera décalé dans le temps. Plus les CE hebdomadaires sont importantes (supérieurs à 3800 u.a.), plus les alternances hautes CE et basses CE devront être importantes. Nos résultats montrent que les joueuses pratiquent des charges alternées. La répartition hebdomadaire du volume et de l'intensité revêt donc un aspect déterminant. Il semble que la stratégie la plus efficace soit de s'entraîner entre 11 et 12 heures par semaine en période de compétition et approximativement 18 heures en période de préparation (Tonnessen et coll., 2014). Le début de semaine étant préférentiellement marqué par des volumes importants et la fin de semaine par des intensités importantes. Les performances neuromusculaires et la perception de la fatigue semblent en effet plus importantes durant les 48 heures qui suivent la compétition (McLean et coll., 2010 ; Johnston et coll., 2013). Il est par contre important de noter que notre modélisation ne permet pas de différencier clairement le

volume et l'intensité. Il est en effet possible d'obtenir une charge d'entraînement de 500 u. a. avec une séance de 100 minutes à une intensité moyenne de 5 sur 10, mais aussi avec une séance de 50 minutes à une intensité maximale de 10 sur 10. Une application en ligne, avec des rapports sous forme de graphiques quotidiens et hebdomadaires montre ici toute sa pertinence pour améliorer l'analyse des données.

Les deux modèles diffèrent cependant par le nombre de paramètres à déterminer par itérations successives. Notre modélisation n'en comporte que deux où le modèle de Banister et coll. (1975) en nécessite quatre, dont deux sont des facteurs pondérateurs sans réalité scientifique potentiellement identifiable. Les deux modélisations ont pour inconvénient de nécessiter la réalisation de nombreux tests de terrain ou performances pour ajuster les paramètres. A cet effet, il est communément admis de réaliser au minimum dix tests par paramètres. Il serait donc nécessaire d'avoir au minimum vingt tests pour notre modélisation et quarante pour la modélisation de Banister et coll. (1975). Cela induit une latence de quelques semaines afin d'obtenir un nombre de tests suffisants. Toutefois, la corrélation des paramètres de notre modélisation avec l'âge peut permettre son utilisation immédiate avec des valeurs par défaut qui pourraient être proches des valeurs individuelles réelles obtenues ensuite par itération avec des tests de terrain. À ce sujet, Hellard et coll. (2006) notent qu'un des moyens les plus directs pour paramétrer un modèle serait de collecter un nombre important de données complémentaires.

L'être humain évoluant durant sa vie, modéliser ses performances s'avère donc excessivement complexe. Ces variations peuvent être de nature gaussienne, de type log-normal mais aussi de type sigmoïde.

Ainsi, une première limite des modélisations des effets de l'entraînement, notamment ceux qui sont basés sur le modèle originel de Banister et coll. (1975), est qu'il n'y ait pas de seuils inférieurs ou supérieurs à la performance, à savoir qu'une plus grande CE conduit inévitablement à une meilleure performance. Dans les faits, il y aura toujours un moment où l'entraînement ne produira plus d'augmentation de performance, mais une stabilisation, une diminution, des blessures, et dans un cas extrême un état de surentraînement. Bien que ces limites semblent prises en compte par leur modélisation, les propositions de Perl J. (2000, 2001a et 2001b) et Hohman et coll. (2000) augmentent la complexité mathématique, freinant par conséquent leur mise en œuvre réelle.

Une deuxième limite tient aux valeurs de τ_1 et τ_2 . Le modèle de Banister et coll. (1975) est relativement peu sensible aux variations de τ_1 . Augmenter ou diminuer τ_1 de 10 % conduit à une variation de prédiction inférieure à 5 %. De plus, les valeurs présentes dans la littérature scientifique montrent une grande variabilité. Les valeurs de τ_1 s'échelonnent de 2 ± 2 jours (Busso et coll., 1991) à 19 ± 8 jours (Hellard et coll., 2005) et les valeurs de τ_2 s'échelonnent de 35 ± 12 jours (Busso et coll., 1993) à 60 jours (Busso et coll., 1997). Dans une revue critique de la littérature, Hellard et coll. (2006) évaluant la robustesse, la précision, la stabilité du modèle de Banister et coll. (1975), démontrent la grande variabilité du modèle et aussi sa grande stabilité, mais pointent la limite de l'utilisation des constantes de temps pour traduire les effets de l'entraînement.

Ainsi, les limites du modèle proviennent sans doute des paramètres eux-mêmes en tant que marqueurs liés à d'entraînement et à la performance. En 1994, Busso et coll. s'interrogeaient déjà sur la pertinence du modèle original en précisant que l'aptitude et la fatigue sont concomitantes et inhérentes au stimulus d'entraînement. Le plus intéressant est que, quels que soient les modes de calcul, l'aptitude et la fatigue, calculées sur l'ensemble des séances étaient corrélées avec la performance, mais que combinées, les influences négatives et positives sont plus proches des variations réelles de performance.

Dans cette approche, partant du principe qu'aucune modélisation fonctionnelle n'intègre explicitement la notion de seuils (c.-à-d., définissant de zone optimale), et que le choix du marqueur est déterminant, nous nous inscrirons dans une démarche de type heuristique. Reconnaître les signes d'une adaptation optimale ou excessive (Kenttä et coll., 2001 ; Kellmann M., 2010) à l'entraînement, représente un enjeu important pour la planification des entraînements des sportifs de haut niveau afin d'identifier les mécanismes physiologiques et/ou psychologiques sous-jacents.

La collecte de données d'entraînement en grande quantité semblait alors indispensable pour définir les marqueurs qui pouvaient être potentiellement utilisés pour gérer et optimiser les relations entraînement/récupération favorisant les gains de performances significatifs aux moments clés de la saison.

Halson S.L. (2014) précise les principales caractéristiques d'un système de suivi efficace et durable pour s'assurer que les données sont effectivement saisies et ainsi

mieux comprendre la fatigue des sportifs. Elle identifie plusieurs caractéristiques essentielles d'un tel système :

- Facilité d'utilisation - Conception intuitive
- Graphiques et rapports efficaces
- Peut-être utilisé en ligne et hors ligne
- Adaptable à tous les sports
- Variations facilement perceptibles
- Produire des données individuelles et collectives
- Devrait inclure une évaluation du cognitif

4.5- MARQUEURS

La limite majeure de notre modélisation est qu'elle ne définit pas de zone optimale de CE, entre zone de sous charge et zone de surcharge préjudiciable aux adaptations espérées par les entraînements. C'est la raison première qui nous a conduits à utiliser plusieurs marqueurs subjectifs, utilisés dans la grande majorité des batteries de tests psychologiques (Hooper et coll., 1999 ; Kenttä et coll., 2006) et à nous inspirer du concept de stress et du syndrome général d'adaptation (Selye H., 1975). Nous n'avons hélas pas pu mettre en place un suivi biologique individuel régulier qui aurait certainement apporté des informations complémentaires très intéressantes pour mieux appréhender les mécanismes physiologiques sous-jacents (Heisterberg et coll., 2013), et de mesurer l'influence du cycle menstruel sur la performance (Giacomoni et coll., 2000 ; Janse de Jonge X.A., 2003). Savage et Clarkson (2002) montrent notamment que les femmes n'utilisant pas de contraceptifs oraux ne sont pas plus sensibles aux dommages musculaires que les autres femmes, mais montrent un délai de récupération moins important. L'expérimentation de Hooper et coll. (1997) nous semble pilote et riche d'enseignements.

Les joueuses ont effectivement déclaré des douleurs, mais elles ne semblaient pas assez invalidantes pour imposer un arrêt significatif de l'entraînement. La valeur moyenne des douleurs était de $4,6 \pm 2,5$ u.a. Un niveau a priori insuffisant pour induire un arrêt complet de la pratique de plusieurs jours. Les joueuses ont déclaré une ou plusieurs douleurs pour $28 \pm 18,3$ % du temps d'entraînement (avec comme valeur

minimale 10 % et valeur maximale 62 %). Les douleurs déclarées semblent plus liées à l'enchaînement des séances et aux contacts répétés des membres supérieurs sur le ballon. Douleurs qui ne semblent pas être symptomatiques de l'atteinte d'un stade d'épuisement.

Les douleurs sont en effet localisées pour 54,6 % du côté droit et pour 27,8 % au côté gauche. Elles sont réparties pour 46,3 % sous le niveau de la taille, et pour 44,7 % au-dessus. Ce sont le membre supérieur droit et le membre inférieur gauche qui sont les plus représentés (33,4 % et 25,1 %, respectivement). Il est intéressant de noter que la zone anatomique charnière postérieure (lombaires) fait l'objet de 12,2 % des déclarations de douleurs. Pour des joueuses droitrières, les douleurs sont principalement localisées sur une ligne partant de l'épaule droite à la jambe gauche, chaîne musculaire qui est la plus sollicitée. Nos résultats sont conformes à ceux de Aagaard & Jorgensen (1996) qui trouvent 22 % de blessures au niveau de l'épaule et 46 % de blessures sur la partie supérieure du corps des volleyeuses. Ils précisent que les blessures à la cheville et aux doigts sont les conséquences de traumatismes directs alors que les blessures aux épaules et aux genoux sont plutôt la conséquence de la répétition des mouvements. Aagaard & Jorgensen (1996) notent que ces blessures sont essentiellement dues à la forte augmentation de la CE depuis les vingt dernières années. Augustsson et coll. (2006) notent que 62 % des blessures au volley-ball sont d'une sévérité mineure et apparaissent pour 47 % lors des entraînements. Notre étude n'a pu mettre en évidence cette relation entre CE et blessure car aucune joueuse n'a été blessée durant la période de suivi.

La principale découverte de cette étude est que les marqueurs suivis ne sont pas tous associés et ne semblent pas être dépendants de la charge d'entraînement. Il n'y a en effet que très peu de corrélations significatives entre les clusters, plus précisément entre les variables qui représentent les clusters. Cela signifie que les variables associées à ces clusters ne semblent pas s'influencer directement. Les marqueurs maîtrise technique/tactique, humeur, sommeil ne sont pas directement influencés par la charge d'entraînement.

Les variables associées au calcul de la CE sont logiquement toutes dans le même cluster. La durée et l'intensité moyenne se trouvent dans le même cluster que la charge d'entraînement, ainsi que l'intensité maximale. Les hautes charges sont associées à des

durées élevées et des intensités moyennes et maximales élevées. Inversement, les faibles charges d'entraînement sont associées avec des durées et des intensités faibles. Cela peut interroger. De nombreuses études sur l'affûtage montrent que l'intensité est un facteur important qui devrait rester constant à un niveau élevé. Ce serait la diminution progressive du volume (de 60 à 90 %) qui permettrait un affûtage optimal à l'approche des compétitions (Bosquet et coll., 2007 ; Mujika & Padilla, 2003 ; Mujika I., 2010). Dans notre étude, les variations d'intensité sont similaires aux variations de durée. Une saison de volley comportant pourtant vingt-quatre matchs (en moyenne un match par semaine sur une période de vingt-quatre semaines), l'application des principes communément admis sur l'affûtage devrait logiquement amener un partitionnement des variables durée et intensité sur des clusters différents (sauf si leurs variations respectives sont strictement inversement proportionnelles).

Si la durée et l'intensité de l'effort peuvent être connues et déterminées a priori avec précision par l'entraîneur, notamment en utilisant la fréquence cardiaque (Banister et coll., 1975), la lactatémie (Mujika et coll., 1995 ; Wood et coll., 2005) ou la vitesse (Hayes & Quinn, 2009), celui de leur perception réelle a posteriori par le sportif peut être différente, et reste tributaire, pour l'intensité, d'une évaluation subjective (Borg G., 1982 ; Foster et coll., 1995). La mesure de l'intensité au moyen unique de marqueurs objectifs peut donc biaiser l'élaboration des modèles d'entraînements. Scanlan et coll. (2014) notent à cet effet que, malgré des relations significatives entre la charge interne et la charge externe, l'amplitude des corrélations et les faibles valeurs propres « communalities » suggèrent que la charge interne, mesurée avec RPE ou la fréquence cardiaque, ne mesure pas la même chose que la charge externe mesurée avec un accéléromètre. La relation entre les deux n'étant pas linéaire, ils recommandent de combiner les deux pour l'entraînement des basketteurs.

Cette non-dissociation de l'intensité et de la durée est une limite majeure des modélisations des effets de l'entraînement et des méthodes de quantification de la charge. Une charge de 300 u.a. peut être obtenue avec 100 minutes d'entraînement à une intensité moyenne de 3/10. Mais aussi avec une durée de 50 minutes à une intensité de 6/10. La seule prise en compte de la CE dans la mesure des effets de l'entraînement semble donc discutable ce qui contribue à s'orienter vers l'analyse de plusieurs marqueurs.

De manière complémentaire, il est intéressant de noter que la CPQ, calculée à l'aide des oscillations harmoniques amorties, est significativement et bien corrélée avec le cluster associant la charge, la durée et l'intensité moyenne ($-0,67 \pm 0,15$; $-0,37 > r > -0,78$) pour les six volleyeuses. Cependant, la charge d'entraînement ne semble pouvoir à elle seule expliquer les variations de performance ou de fatigue des volleyeuses durant l'année.

Le second cluster regroupe l'humeur et la maîtrise technique/tactique perçue pour quatre filles sur six. L'humeur peut influencer directement la perception de la difficulté. Une humeur positive l'augmenterait, alors qu'une humeur négative le diminuerait (Gros Lambert & Mahon, 2006). Une étude portant sur quatre-vingt-quatre rameuses en lice pour une place dans l'équipe première d'aviron montre que l'humeur se détériore durant la période d'entraînement. À la fin de la période d'entraînement, les rameuses non sélectionnées possédaient encore un trouble élevé de l'humeur alors que l'humeur des rameuses sélectionnées était revenue à leur niveau initial (Raglin et coll, 1989). La charge affective, bien que difficile à définir, pourrait influencer l'exécution des gestes sportifs et des choix tactiques de la joueuse.

Selon le modèle théorique de Lane et coll. (2001), la dépression serait une variable modératrice entre les manifestations de l'humeur et la performance sportive. Des niveaux élevés de dépression s'accompagneraient d'une augmentation de la colère, de la tension, de la confusion et de la fatigue. L'augmentation des états d'humeur négatifs nuirait à la performance. Beedie et coll. (2005) montrent ainsi qu'il existe une relation faible à moyenne entre l'humeur avant la compétition et la performance, mais qu'elle est un indice de prédiction de la performance relativement faible. Sans doute parce que l'humeur est une réponse psychologique éphémère à un stimulus environnemental, intervenant dans une situation donnée et qu'elle varie donc quand la situation change.

Faude et coll. (2011), dans une étude avec quinze joueurs de football professionnel, notent que l'humeur ne reflète qu'une partie seulement de la vie du sportif. Les valeurs des tests de sauts verticaux n'étaient pas inversement corrélées avec le score de récupération du REST-Q, mais l'étaient avec le score de Stress Total ($r = -0,55$ et $r = -0,61$, $p < 0,03$). Ils concluent que la pratique régulière d'un championnat de football ne provoque pas de changements importants de performance, mais que

l'évaluation du stress accumulé peut être mise en évidence par des dégradations d'ordre psychométrique.

Kellmann & Günther (2000) montrent, dans une étude sur la préparation de rameurs aux Jeux olympiques de 1996, l'intérêt du suivi de facteurs caractéristiques du stress et de la récupération (Kellmann M., 2010). L'entraînement est souvent la réalisation rigoureuse par le sportif de contenus déterminés par l'entraîneur de manière souvent unilatérale. La participation active du sportif à la gestion du programme d'entraînement, tenant compte de ses sensations, pourrait donc permettre d'apporter suffisamment d'attention à la récupération des efforts réalisés (Kenttä et coll., 2001).

Nous pouvons cependant noter que le marqueur Fatigue de notre étude n'est pas affecté au même cluster pour l'ensemble des joueuses. Pour une joueuse il est attaché au cluster comprenant le marqueur Maîtrise technique/tactique. Pour deux joueuses, il est attaché au cluster comprenant la charge d'entraînement, la durée et l'intensité moyenne. Hooper et coll. (1995) montrent que chez des nageurs de haut niveau, un indice de fatigue supérieur à 5 (sur une échelle de perception de 7), et relevé pendant au moins sept jours consécutifs constitue un syndrome de surentraînement. Le suivi de ce marqueur sur une cohorte de sportifs plus importante et sur plusieurs années semblerait intéressant pour mettre en évidence le caractère personnel de l'expression de la fatigue. Pierce E.F. (2002) montre que chez des nageurs l'item fatigue du POMS était significativement corrélé avec le volume d'entraînement ($r=0,53$), mais que les moyennes des scores de tension, de dépression, de confusion, et d'humeur globale ne l'étaient pas.

Le troisième cluster regroupe les marqueurs Sommeil et Endormissement pour cinq des six joueuses. Le sommeil est un élément essentiel pour la récupération des athlètes en raison de ses effets réparateurs aux niveaux physiologique et psychologique. Chez le joueur de sports collectifs, sa durée moyenne est approximativement de sept heures (Lastella et coll., 2014b). Dans une étude portant sur 632 sportifs allemands de tous sports, Erlacher et coll. (2011) montrent également que 65,8 % des sportifs ont vécu un mauvais sommeil la nuit précédant un événement sportif majeur. Le problème principal n'a pas été de ne pas pouvoir s'endormir. La nervosité et les pensées sur la compétition étaient les principales causes. De plus, la majorité des athlètes ayant déclaré des troubles du sommeil mentionne que cela n'avait aucune influence sur leur

performance sportive. Toutefois, ils ont signalé une mauvaise humeur le lendemain, ainsi qu'une augmentation de la somnolence diurne.

Les facteurs liés à l'anxiété au moment du coucher semblent donc allonger la période d'endormissement. Nos résultats s'inscrivent dans la même direction que l'étude de Narisawa H. (2013) qui montre que les sujets ayant un endormissement difficile ont aussi une qualité de sommeil dégradé et une moins bonne capacité de récupération de la fatigue. Dans notre étude, ces deux marqueurs sont en effet dans le même cluster. Nous pouvons aussi noter que pour trois joueuses, le marqueur Fatigue est aussi attaché à ce cluster. Le manque de corrélations entre le cluster Sommeil/Endormissement et le cluster Durée/Intensité tend à confirmer que la charge n'a pas d'effets sur la qualité du sommeil. L'étude de Robey et coll. (2014) qui avait pour objectif de mesurer l'effet de l'entraînement à haute intensité en début de soirée sur la qualité et la quantité du sommeil de joueurs élités masculins de football à l'aide d'un actigraphe arrive à la même conclusion. Dans le cadre de l'étude des effets de différents moyens de récupération, Duffield et coll. (2014) montrent que des recommandations sur le sommeil aident à réduire les douleurs perçues.

Nos résultats mettent aussi en évidence que les douleurs perçues par les joueuses corrèlent avec les clusters comprenant le sommeil et/ou l'endormissement pour quatre des six joueuses ($r=0,48\pm 0,02$, $p<0,05$). Le suivi de la vitesse d'endormissement et de la qualité du sommeil semble donc intéressant dans le cadre d'un processus d'amélioration de la performance. Il serait très certainement intéressant de mesurer également la durée du sommeil. Sargent et coll. (2014) montrent en effet que la durée du sommeil influence le niveau de fatigue pré-entraînement chez les sportifs de haut niveau. Les courtes durées sont associées avec les plus hauts niveaux de fatigue pré-entraînement. Dans certains cas, ils recommandent ainsi de faire une courte sieste. En moyenne, les soixante-dix sportifs de haut niveau étaient dans leur lit à $08h18\pm 01h12$, s'endormaient à $23h06\pm 01h12$, se réveillaient à $6h48\pm 01h30$ et dormaient $06h30\pm 01h24$.

La mesure longitudinale d'un grand nombre de marqueurs perceptifs et leurs analyses factorielles et aussi clustering semblent donc pouvoir permettre d'explorer les modèles d'entraînement les plus efficaces. Hellard et coll. (2013) montrent ainsi que le modèle optimal d'entraînement de nageurs de haut niveau évoluait au cours de leur

carrière, suggérant que les effets de l'entraînement dépendent du nombre d'années de confrontation avec de hautes charges d'entraînement (Avalos et coll., 2003). De manière complémentaire, une étude de Steinacker et coll. (2000) montre que des signes caractéristiques de surentraînement ont été trouvés après dix-huit jours d'entraînement intense de rameurs de haut niveau (baisse de performance, diminution des hormones stéroïdes hypothalamiques et détérioration de paramètres de questionnaire psychologique). Après une période d'affûtage avant les championnats du monde, les valeurs sont retournées à leur niveau initial. Les auteurs indiquent que le surmenage est une part intégrante des plans d'entraînement et qu'il peut être analysé par une approche multifactorielle impliquant des données biologiques et psychométriques.

4.6- PERSPECTIVES

Deux études complémentaires ont débuté depuis le mois de juin 2014. Elles se déroulent dans un centre de formation de club professionnel avec 20 jeunes footballeurs et dans un club de football professionnel avec 28 joueurs. Les nombreux échanges avec les entraîneurs nous ont conduits à tester de nouveaux marqueurs. Afin de mieux mesurer l'impact des conditions d'entraînement sur les blessures et les douleurs, les marqueurs « Conditions météorologiques » et « État du terrain » ont remplacé le marqueur « Conditions d'entraînement ». Les blessures et les douleurs sont en effet une préoccupation importante des staffs techniques et médicaux. En complément du logiciel utilisé par le médecin et des saisies des douleurs (intensité, localisation, mécanisme) des joueurs, l'interface du préparateur physique lui permet de préciser le type de blessure de chaque sportif pour chaque entraînement et d'y associer un commentaire détaillé.

Les footballeurs professionnels étant régulièrement suivis par une psychologue spécialiste des sportifs de haut-niveau, il nous a semblé intéressant d'ajouter les marqueurs « Activation mentale », « Confiance en soi » et « Vie personnelle ». Tous les joueurs sont formés à ces concepts et en connaissent parfaitement la signification. Ils passent trois fois par an des tests psychologiques.

L'endormissement et le sommeil étant des paramètres déterminants de la récupération, les joueurs peuvent aussi préciser la durée du sommeil. Dans un premier temps nous avons ajouté deux listes déroulantes à l'écran, une pour l'heure du coucher et une pour l'heure du réveil, mais les joueurs trouvaient ces demandes trop intrusives. Ils ont préféré n'avoir qu'une seule liste déroulante précisant la durée du sommeil.

Compte tenu des contraintes scolaires des jeunes footballeurs, le préparateur physique a également souhaité ajouter le marqueur « Vie scolaire ».

Afin de faciliter la lecture des données pour les entraîneurs, nous testons un nouvel indice que nous avons nommé « Stress Score ». Basé sur les analyses factorielles, cet indice a pour objectif de synthétiser et pondérer tous les marqueurs pour déterminer un niveau de stress général.

CONCLUSION

Cette présente étude montre (i) qu'une web-application ergonomique permet la mesure longitudinale de nombreux marqueurs malgré les contraintes importantes du milieu de l'entraînement sportif professionnel ; (ii) que cet outil permet d'obtenir des connaissances sur la charge d'entraînement, ses effets et les perceptions du sportif professionnel.

Les facteurs endogènes et exogènes de l'entraînement provoquent des oscillations de performance qui nous ont incités à utiliser la fonction sinus. Notre approche innovante basée sur les oscillations harmoniques amorties semble décrire avec précision les effets de l'entraînement sur la capacité de performance quotidienne. Elle confirme également que l'utilisation de marqueurs perceptifs peut être un moyen pratique de gérer la charge d'entraînement, mais aussi une source d'informations importantes sur la compréhension du sportif de haut niveau.

La modélisation des effets de l'entraînement sur la performance permet de mieux conceptualiser les adaptations du sportif pour aider les entraîneurs confrontés quotidiennement à de multiples incertitudes. Mais sa complexité reste un frein majeur au développement et à la vulgarisation réelle de la quantification de la charge d'entraînement. Les modélisations et méthodes actuelles ne permettant en effet que difficilement de la quantifier et de la suivre individuellement en routine quotidienne dans les sports collectifs professionnels.

Toute charge d'entraînement provoque des effets différés et cumulés dépendants du niveau d'expertise, de l'intensité de l'effort, de la durée des stimuli d'entraînement, mais aussi des charges d'entraînement précédentes. Les développements technologiques actuels, l'augmentation constante de la capacité de stockage et de traitement des données des systèmes informatiques nous donnent aujourd'hui la possibilité de mettre en place des mesures répétées de nombreux marqueurs, qui peuvent ne pas être exclusivement physiologiques. La difficulté, voir l'impossibilité à trouver un ou plusieurs marqueurs biologiques caractéristiques de la charge d'entraînement nous a alors incité à suivre plusieurs marqueurs perceptifs. Il nous a alors semblé intéressant de concevoir un système informatique ergonomique destiné à collecter, traiter et

représenter les données en tous lieux et en tout temps, mais aussi de tenter de modéliser les réponses du sportif aux différents stimuli d'entraînement, non pas tant en termes de performance que de capacité de performance quotidienne.

Au terme de notre travail, nous pouvons avancer que cette thèse a apporté des résultats spécifiques à ces problématiques. Un modèle à deux paramètres basé sur le principe d'une oscillation harmonique amortie, inspiré des mécanismes généraux de l'homéostasie, a été implémenté dans une web-application. Après ajustement au moyen de tests de terrain, il fournit à l'entraîneur un outil important pour faciliter la gestion de la charge d'entraînement dans les sports collectifs de haut niveau et l'aider à amener un sportif au meilleur de sa capacité de performance, le ou les moments voulus. C'est en ce sens un concept prometteur et un outil d'aide à la décision. Compte tenu du nombre de sujets de notre étude (6 joueuses), de plus amples recherches sont nécessaires pour valider le modèle et déterminer son niveau de fiabilité dans le cadre de l'entraînement sportif de haut niveau. Mais aussi pour déterminer quels sont le ou les marqueurs les plus pertinents pour délimiter les zones de sous charge et de surcharge.

Nous avons souhaité, par cette étude, renforcer les échanges entre les chercheurs et les entraîneurs par la conception collaborative d'outils réellement utilisables permettant de juger de l'efficacité d'une ou de plusieurs stratégies de périodisation de l'entraînement. Ils doivent permettre de vérifier quotidiennement la mise en application des principes fondamentaux comme peuvent l'être la spécificité et l'alternance charge-décharge. Stratégies qu'il convient d'adapter aux différentes périodes que sont la préparation d'avant saison, l'affûtage et l'intersaison, mais aussi aux différentes étapes de la carrière sportive.

Il nous semble que la finalité première d'un système informatique ergonomique dans le sport de haut niveau est de permettre aux entraîneurs de clarifier la vision du contexte dans lequel leurs décisions sont prises. Il doit également permettre aux chercheurs d'analyser le « Big data » de l'activité du sportif afin de déterminer si des variations sont néfastes, sans effets ou bénéfiques à la capacité de performance quotidienne.

Ce système informatique de suivi de l'activité physique pourrait être généralisé à différents publics. Par exemple, chez la personne âgée pour laquelle l'Organisation

mondiale de la Santé⁷⁷ recommande de pratiquer au moins une fois par semaine cent cinquante minutes d'activités d'endurance d'intensité modérée ou soixante-quinze minutes d'activité d'endurance d'intensité soutenue, ou une combinaison des deux. Activité physique qui est destinée à améliorer leur endurance cardio-vasculaire, leur état musculaire et réduire les risques de maladies et de dépression (Buchman et coll., 2013).

La phase de réhabilitation post-blessure étant une étape importante pour préserver la capacité de performance future d'un sportif, ce système pourrait être également un outil central permettant de gérer individuellement le travail réalisé lors des périodes de réhabilitation en collaboration avec l'équipe médicale.

⁷⁷ http://www.who.int/dietphysicalactivity/factsheet_olderadults/fr/

BIBLIOGRAPHIE

A

- Aagaard, H. & Jorgensen, U. (1996). Injuries in elite volleyball. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 6 (4) : 228-32
- Achten, J. & Jeudenkup, A.E. (2003). Heart rate monitoring : applications and limitations. *Sports Medicine*, 33 (7) : 517-38
- Alexiou, A.J. & Coutts, A.J. (2008). A comparison of methods used for quantifying internal training load in various modes of training in women soccer players. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 3 (3) : 320 - 30
- Algrøy, E.A, Hetlelid, K. J., Seiler, S., & Stray Pedersen, J. I. (2011). Quantifying training intensity distribution in a group of Norwegian professional soccer players. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 6 (1) : 70-81
- Anderson, L., Triplett-McBride, T., Foster, C., Doberstein, S., & Brice, G. (2003). Impact of Training Patterns on Incidence of Illness and Injury During a Women's Collegiate Basketball Season. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 17 (4) : 734-738
- Aronson, B.D., Bell-Pedersen, D., Block, G.D., Bos, N.P., Dunlap, J.C., Eskin, A., Garceau, N.Y., Geusz, M.E., Johnson, K.A., Khalsa, S.B., and al. (1993). Circadian rhythms. *Brain Research Reviews*, 18 (3) : 315-33
- Asmussen, E. (1979). Muscle fatigue. *Medicine & Science in Sports*, 11 (4) : 313-21
- Atkinson, T. & Reilly, T. (1996). Circadian variation in sports performance. *Sports Medicine*, 21 (4) : 292-312
- Atkinson, G., Todd C., Reilly T. & Waterhouse J.J. (2005). Diurnal variation in cycling performance : influence of warm-up. *Journal of Sports Science*, 23 (3) : 321-9
- Augustsson, S.R., Augustsson, J., Thomeé, R. & Svantesson, U. (2006). Injuries and preventive actions in elite Swedish volleyball. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 16 (6) : 433-40
- Avalos, M., Hellard, P. & Chatard, J.C. (2003). Modelling the training-performance relationship using the mixed model in elite swimmers. *Medicine & Science in Sports & Exercice*, 35 (5) : 838-46

B

- Balsalobre-Fernandez, C., Tejero-González, C. M. & Del Campo-Vecino, J. (2014). Relationships between Training Load, Salivary Cortisol Responses and Performance during Season Training in Middle and Long Distance Runners. *PLoS One*, 9 (8) : e106066
- Banister, E.W., Calvert, T.W., Savage, M. V. & Bach, T. (1975). A systems model of training for athletic performance. *Australian Journal of Sports Medicine & Exercise Science*, 7 : 57-61
- Banister, E.W. & Calvert, T.W. (1980). Planning for future performance : implications for long term training. *Canadian Journal of Applied Sport Science*, 5 (3) : 170-6
- Banister, E.W. (1982). Modeling Elite Athletic Performance. In J.D. MacDougall, H.W. Wenger, & H.J. Green (Eds.), *Physiological Testing of Elite Athletes* (pp. 403-425). Champaign (I : I.) : Human Kinetics Publishers.
- Banister, E.W. & Hamilton, C.L. (1985). Variations in iron status with fatigue modelled from training in female distance runners. *European Journal of Applied Physiology*, 54 (1) : 16-23
- Banister, E.W., Morton, R.H. & Fitz-Clarke, J. (1992). Dose/response effects of exercise modeled from training : physical and biochemical measures. *The Annals of physiological anthropology*, 11 (3) : 345-356
- Banister, E.W., Carter, J.B., & Zarkadas, P.C. (1999). Training theory and taper : Validation in triathlon athletes. *European Journal of Physiology and Occupational Physiology*, 79 (2) : 182-91
- Barbero-Alvarez, J.C., Coutts, A., Granda, J., Barbero-Alvarez, V. & Castagna, C. (2010). The validity and reliability of a global positioning satellite system device to assess speed and repeated sprint ability (RSA) in athletes. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 13 (2) : 232-5
- Beanland, E., Main, L.C., Aisbett, B., Gatin, P. & Netto, K. (2014). Validation of GPS and accelerometer technology in swimming. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 17 (2) : 234-238
- Beedie, C., Terry, P. & Lane, A. (2005). Distinctions between emotion and mood. *Cognition & Emotion*, 19 (6) : 847-878
- Ben Belgith, A., Ahmaidi, S., Maille, P., Noirez, P., & Desgorces, F.-D. (2012). Quantification de la charge d'entraînement imposée au footballeur professionnel en phase de réhabilitation athlétique post-blessure. *Science & Sports*, 27 (3) : 169-174
- Berg, K. (2003) Endurance training and performance in runners : research limitations and unanswered questions. *Sports Medicine*, 33 (1) : 59-73

- Berthelot, G., Len, S., Hellard, P., Tafflet, M., Guillaume, M., Vollmer, J.C., Gager, B., Quinquis, L., Marc, A. & Toussaint, J.F. (2012). Exponential growth combined with exponential decline explains lifetime performance evolution in individual and human species. *Age*, 4 : 1001-9
- Bigland-Ritchie, B. & Woods, J.J. (1984). Changes in muscle contractile properties and neural control during human muscular fatigue. *Muscle and Nerve*, 7 (9) : 691-99
- Bijur, P.E., Silver, W. & Gallagher, E.J. (2001). Reliability of the visual analog scale for measurement of acute pain. *Academic Emergency Medicine*, 8 (12) : 1153-7
- Bijur, P.E., Latimer, C.T. & Gallagher, E.J. (2003). Validation of a verbally administered numerical rating scale of acute pain for use in the emergency department. *Academic Emergency Medicine*, 10 (4) : 390-2
- Billat, V. (2003). *Méthodologie de l'entraînement, de la théorie à la pratique*. Paris. Editions De Boeck Université.
- Bird, S. (2013). Sleep, recovery and athletic performance : a brief review and recommendations. *Strength & Conditioning Journal*, 35 (5) : 43-47
- Bishop, D.J. (2003). A comparison between land and sand-based tests for beach volleyball assessment. *The Journal of Sports Medicine & Physical Fitness*, 43 (4) : 418-23
- Bobbert, M.F., Van der Krogt, M.M., Van Doorn, H. & de Ruyter, C.J. (2011). Effects of fatigue of plantarflexors on control and performance in vertical jumping. *Medicine & Science in Sports Exercice*, 43 (4) : 673-84
- Bocquet, V., & Billat, V. (1999). Modeles mathematiques et physiologiques de la performance humaine. *Science & Sports*, 14 : 278-291
- Bocquet, V. (2002). *Modélisation de l'endurance humaine, de l'espèce à l'individu*. Paris. Thèse de l'Université Descartes.
- Bodian, C.A., Freedman, G., Hossain, S., Eisenkraft, J.B. & Beilin, Y. (2001). The visual analog scale for pain : clinical significance in postoperative patients. *Anesthesiology*, 95 (6) : 1356-61
- Bompa, T.O. (1985). *Theory and Methodology of Training : The Key to Athletic Performance*. Dubuque, Iowa. Kendall Hunt.
- Bompa, T.O. (1987). *Periodization as a key element of planning*. Belconnen. Australian Coaching Council. Sports coach.
- Bompa, T.O. & Haff, G.G. (2009). *Periodization. Theory and methodology of training*. Dubuque, Iowa. Kendall Hunt
- Bordely, A.A. (1982). A two process model of sleep regulation. *Human Neurobiology*, 1 (3) : 195-204

- Borg, G. (1962). *Physical performance and perceived exertion*. Thèse de l'Université de Copenhague (http://w3.psychology.su.se/staff/eb/Borg_G_1962_thesis.pdf)
- Borg, G. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 2 (2) : 92-8
- Borg, G. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14 (5) : 377-81
- Borg, G. & Borg, P. (1987). *On the relations between category scales and ratio scales and a method for scale transformation*. In : Reports from the Department of Psychology, Stockholm University, Sweden. 672 : 1-14
- Borg, G. & Borg, E. (1994). *Principes and experiments in category-ratio scaling*. In : Reports from the Department of Psychology, Stockholm University, Sweden. 789 : 1-30
- Borresen, J. & Lambert, M.I. (2007). Changes in heart rate recovery in response to acute changes in training load. *European Journal of Applied Physiology*, 101 (4) : 503-11
- 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) : 633-46
- Bosquet, L., Montpetit, J., Arvisais, D. & Mujika, I. (2007). Effects of tapering on performance : a meta-analysis. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39 (8) : 1358-65
- Bosquet, L. (2008). La fréquence cardiaque peut-elle être utilisée pour détecter la fatigue ? *Cardio & Sport*, 15 : 27-30
- Bosquet, L. & Mujika, I. (2012). *Effect of training cessation on endurance performance. Detraining*. In Basque Country (Ed.), Endurance training (pp. 99-106)
- Bosquet, L., Berryman, N., Dupuy, O., Mekary, S., Arvisais, D., Bherer, L. & Mujika, I. (2013). Effect of training cessation on muscular performance : A meta-analysis. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 23 (3) : 140-9
- Brinks, M.S., Visscher, C., Coutts, A.J. & Lemmink, K.A. (2012). Changes in perceived stress and recovery in overreached young elite soccer players. *Scandinavian Journal of Medicine in Sports*, 22 (2) : 285-92
- Brown, L.E. & Greenwood, M. (2005). Periodization essentials and innovations in resistance training protocols. *Strength & Conditioning Journal*. 27 (4) : 80-85
- Buchheit, M., Papelier, Y., Laursen, P.B. & Ahmaidi. (2007). Noninvasive assessment of cardiac parasympathetic function : postexercise heart rate recovery or heart rate variability ? *American Journal of Physiology. Heart & circulatory physiology's*, 293 : H8-H10.

- Buchheit, M., Millet, G.P., Parisy, A., Pourchez, S., Laursen, P.B. & Ahmaidi, S. (2008). Supramaximal training and postexercise parasympathetic reactivation in adolescents. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40 (2) : 362-371
- Buchheit, M. & Laursen, P.B. (2013a). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle : Part I : cardiopulmonary emphasis. *Sports Medicine*, 43 (5) : 313-38
- Buchheit, M. & Laursen, P.B. (2013b). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle : Part II : anaerobic energy, neuromuscular load and practical applications *Sports Medicine*, 43 (10) : 927-54
- Buchheit, M., Al Haddad, H., Simpson, B.M., Palazzi, D., Bourdon, P.C., Di Salvo, V., & Mendez-Villanueva, A. (2014). Monitoring accelerations with GPS in football : time to slow down ? *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 9 (3) : 442-5.
- Buchman, A.S., Wilson, R.S., Yu, L., James, B.D., Boyle, P.A. & Bennett, D.A. (2013). Total daily activity declines more rapidly with increasing age in older adults. *Archives of Gerontology & Geriatrics*, 58 (1) : 74-9
- Busso, T., Häkkinen, K., Pakarinen, A., Carasso, C., Lacour, J. R., Komiet, P. V. & Kauhanen, H. (1990). A systems model of training responses and its relationship to hormonal responses in elite weight-lifters. *European Journal of Applied Physiology Physiology & Occupational Physiology*, 61 (1-2) : 48-54
- Busso, T., Carasso, C. & Lacour, J. R. (1991). Adequacy of a systems structure in the modeling of training effects on performance. *Journal of Applied Physiology*, 71 (5) : 2044-9
- Busso, T., Candau, R. & Lacour, J.-R. (1994). Fatigue and fitness modelled from the effects of training on performance. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 69 (1) : 50-54
- Busso, T., Denis, C., Bonnefoy, R., Geysant, A. & Lacour, J. R. (1997). Modeling of adaptations to physical training by using a recursive least squares algorithm. *Journal of Applied Physiology*, 82 (5) : 1685-93
- Busso, T., Benoit, H., Bonnefoy, R., Feasson, L. & Lacour, J. R. (2002). Effects of training frequency on the dynamics of performance response to a single training bout. *Journal of Applied Physiology*, 92 (2) : 572-80
- Busso, T. (2003). Variable dose-response relationship between exercise training and performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35 (7) : 1188-95.
- Busso, T., & Thomas, L. (2006). Using mathematical modeling in training planning. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 1 (4) : 400-405

C

- Calvert, W.T., Banister, E.W., Savage, M.V. & Bach, T. (1976). A system model of the effects of training on physical performance. *IEEE Transactions on systems, man, & cybernetics*, 6 (2) : 94-102
- Candau, R., Busso, T. & Lacour, J.R. (1992). Effects on training on iron status in cross-country skiers. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 64 (6) : 497-502
- Cannon, W.B. (1929). Organization for physiological homeostasis. *Physiological reviews*, 9 (3) : 399-431.
- Carling, C., Wright, C., Nelson, L.J. & Bradley, P.S. (2014). Comment on « Performance analysis in football : A critical review and implications for future research ». *Journal of Sports Sciences*, 32 (1) : 2-7.
- Castellano, J., Casamichana, D., Calleja-González, J., Román, J.S. & Ostojic S.M. (2011). Reliability and accuracy of 10 Hz GPS devices for short-distance exercise. *Journal of Sports Science & Medicine*, 10 (1) : 233-4
- Cazorla, G., Petibois, C., Bosquet, L. & Léger, L. (2001). Lactate et exercice : mythes et réalités. *Revue STAPS*, 54 : 63-76
- Chalencon, S., Busso, T., Lacour, J.R., Garet, M., Pichot, V., Connes, P., Gabel, C.P., Roche, F. & Barthélémy, J.C. (2012). A model for the training effects in swimming demonstrates a strong relationship between parasympathetic activity, performance and index of fatigue. *PLoS One* 7 (12) : e52636
- Chennaoui, M., Arnal, P.J., Sauvet, F. & Léger, D. (2015). Sleep and exercise : a reciprocal issue ? *Sleep Medicine Reviews*, 20 : 59-72
- Cockerill, I.M., Nevill, A.M. & Lyons, N. (1991). Modelling mood states in athletic performance. *Journal of Sports Science*, 9 (2) : 205-12
- Coggan, A. (2003). Training and racing using a power meter : an introduction. *Site Inspired performance multisports* (en ligne). Mis à jour le 25 mars 2003. http://www.inspiredperformancecoaching.com/ref_lib/Coggan_Power_Meter.pdf. Page consultée le 1 septembre 2013.
- Cormack, S.J., Newton, R.U., McGuigan, M.R. & Doyle, T.L. (2008). Reliability of measures obtained during single and repeated countermovement jumps. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 3 (2) : 131-44.
- Cornelissen, G. (2014). Cosinor-based rhythmometry. *Theoretical Biology & Medical Modelling*, 11 : 11-16
- Costa, M.J., Bragada, J.A., Marinho, D.A., Silva, A.J. & Barbosa, TM. (2012).

- Longitudinal interventions in elite swimming : a systematic review based on energetics, biomechanics, and performance. *Journal of Strength Conditioning & Research*, 26 (7) : 2006-16
- Counsilman, B.E. & Counsilman, J.E. (1991). The residual effect of training. *Journal of Swimming Research*, 7 : 5-12
- Coutts, A.J., Murphy, A., Pine, M., Reabum, O. & Impellizzeri F. (2003). Validity of the session-RPE method for determining training load in team sport athletes. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 6 (4) : 525
- Coutts, A.J., Wallace, L.K. & Slattery, K.M. (2007). Monitoring changes in performance, physiology, biochemistry, and psychology during overreaching and recovery in triathletes. *International Journal of Sports Medicine*, 28 (2) : 125-34
- Coutts, A.J., Rampinini, E., Marcora, S.M., Castagna, C. & Impellizzeri, F.M. (2009). Heart rate and blood lactate correlates of perceived exertion during small-sided soccer games. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 12 (1) : 79-84
- Coutts, A.J. (2014). In the age of technology, Occam's razor still applies. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 9 (5) : 741
- Creer, A.R., Ricard, M.D., Conlee, R.K., Hoyt, G.L. & Parcell, A.C. (2004). Neural, metabolic, and performance adaptations to four weeks of high-intensity sprint-interval training in trained cyclists. *International Journal of Sports Medicine*, 25 (2) : 92-98
- Crewe, H., Tucker, R. & Noakes T. (2008). The rate of increase in rating of perceived exertion predicts the duration of exercise to fatigue at a fixed power output in different environmental conditions. *European Journal of Applied Physiology*, 103 : 569-77
- Cunniffe, B., Griffiths, H., Proctor, W., Jones, K.P., Baker, J.S. & Davies, B. (2009). Illness monitoring in team sports using a web-based training diary. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 19 (6) : 476-481

D

- Danvers, F. (2009). *S'orienter dans la vie : une valeur suprême ? Essai d'anthropologie de la formation*. Villeneuve-d'Ascq : Presses universitaires du Septentrion
- Daussin, F.N., Ponsot, E., Dufour, S.P., Lonsdorfer-Wolf, E., Doutreleau, S., Geny, B., Piquard, F. & Richard, R. (2007). Improvement of VO₂ max by cardiac output and oxygen extraction adaptation during intermittent versus continuous endurance training. *European Journal of Applied Physiology*, 101 (3) : 377-83
- Daussin, F.N., Zoll, J., Ponsot, E., Dufour, S.P., Doutreleau, S., Lonsdorfer, E., Ventura-Clapier, R., Mettauer, B., Piquard, F., Geny, B. & Richard, R. (2008). Training at

- high exercise intensity promotes qualitative adaptations of mitochondrial function in human skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology*, 104 (5) : 1436-41
- Dawson, E.A., Shave, R., George, K., Whyte, G., Ball, D., Gaze, D. & Collinson, P. (2005). Cardiac drift during prolonged exercise with echocardiographic evidence of reduced diastolic function of the heart. *European Journal of Applied Physiology*, 94 (3) : 305-9
- Day, M.L., McGuigan, M.R., Brice, G. & Foster, C. (2004). Monitoring exercise intensity during resistance training using the session RPE scale. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 18 (2) : 353-8
- Delattre, E., Garcin, M., Mille-Hamard, L. & Billat, V. (2006). Objective and subjective analysis of the training content in young cyclists. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 31 (2) : 118-25
- Delignières, D. (1993). *Approche psychophysique de la perception de la difficulté dans les tâches perceptivo-motrices*. Paris. Thèse de doctorat de l'Université Paris V
- Diafas, V., Chrysiopoulos, K., Diamanti, V., Bachev, V., Kaloupsis, S., Polykratis, M. & Villiotis, A. (2007). Rating of perceived exertion in kayaking ergometry. *Kinesiology*, 39 (1) : 21-27
- Doherty, R.A., Neary, J.P., Bhambhani, Y.N. & Wenger H.A. (2003). Fifteen-day cessation of training on selected physiological and performance variables in women runners. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 17 (3) : 599-607
- Donato, A.J., Tench, K., Glueck, D.H., Seals, D.R., Eskurza, I. & Tanaka H. (2003). Declines in physiological functional capacity with age : a longitudinal study in peak swimming performance. *Journal of Applied Physiology*, 94 (2) : 764-9
- Douda, H., Avloniti, A., Kasabalis, A., Smilios, I., & Tokmakidis, S.P. (2006). Application of Ratings of Perceived Exertion and Physiological Responses to Maximal Effort in Rhythmic Gymnasts. *International Journal of applied sports sciences*, 18 (2) : 78-88
- Driller, M.W., Fell, J.W., Gregory, J.R., Shing, C.M. & Williams, A.D. (2009). The effects of high intensity interval training in welltrained rowers. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 4 (1) : 110 -121
- Dudley, G.A., Abraham, W.M. & Terjung, R.L. (1982). Influence of exercise intensity and duration on biochemical adaptations in skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology*, 53 (4) : 844-50
- Duffiel, R., Murphy, A., Kellett, A. & Reid, M. (2014). Recovery from repeated on-court tennis sessions : combining cold-water immersion, compression, and sleep recovery interventions. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 9 (2) : 273-82

E

- Edelmann-Nusser, J., Hohmann, A. & Henneberg, B. (2002). Modeling and prediction of competitive performance in swimming upon neural networks. *European Journal of Sport Science*, 2 (2) : 1-12
- Edwards, S. (1993). *The heart rate monitor book*. Sacramento. Fleet Feet Press
- Edwards, B.J. & Waterhouse, J. (2009). Effects of one night of partial sleep deprivation upon diurnal rhythms of accuracy and consistency in throwing darts. *Chronobiology International*, 26 (4) : 756-768
- Enoka, R.M. & Stuart, D.G. (1992). Neurobiology of muscle fatigue. *Journal of Applied Physiology*, 72 (5) : 1631-48
- Eom, H.J. & Schutz, R.W. (1992). Statistical analyses of volleyball team performance. *Research Quarterly for Exercise & Sport*, 63 : 11-18
- Erlacher, D., Ehrlenspiel, F., Adegbesan, O.A. & El-Din, H.G. (2011). Sleep habits in German athletes before important competitions or games. *Journal of Sports Science*, 29 (8) : 859-66
- Esteve-Lanao, J., San Juan, A.F., Earnest, C.P., Foster, C. & Lucia, A. (2005). How do endurance runners actually train ? Relationship with competition performance. *Medicine & Science in Sports and Exercise*, 37 (3) : 496-504
- Esteve-Lanao, J., Foster, C., Seiler, S. & Lucia, A. (2007). Impact of training intensity on performance in endurance athletes. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 21 (3) : 943-949

F

- Famose, J.P. (1993). *La performance motrice, un essai de définition*. In : Cognition et performance. Paris. INSEP-Publications
- Faude, O., Kellman, M., Ammann, T., Schnitker, R. & Meyer, T. (2011). Seasonal changes in stress indicators in high level football. *International Journal of Sports & Medicine*. 32 (4) : 259-65
- Fitz-Clarke, J.R., Morton, R.H. & Banister, E.W. (1991). Optimizing athletic by influence curves. *Journal of Applied Physiology*, 71 (3) : 1151-58
- Floria, P. & Harrison, A.J. (2012). The effect of arm action on the vertical jump performance in children and adults females. *Journal of Applied Biomechanics*, 29 (6) : 655-61

- Folkard, S. (1990). Circadian performance rhythms : some practical and theoretical implications. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Science*, 327 (1241) : 543-53
- Foster, C., Hector, L.L., Welsh, R., Schrage, M., Green, M.A. & Snyder A.C. (1995). Effects of specific versus cross-training on running performance. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 70 (4) : 367-72
- Foster, C., Daines, E., Hector, L., Snyder, A.C. & Welsh, R. (1996). Athletic performance in relation to training load. *Wisconsin Medicine Journal*, 95 (6) : 370-4
- Foster, C. (1998). Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 30 (7) : 1164-8
- Foster, C. Daniels, J.T, Seiler, S. (1999). *Perspectives on correct approaches to training*. In : Overload, Performance Incompetence, and regeneration in Sport. New York. Springer US : 27-41
- Foster, C., Florhaug, J.A.A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L. A., Parker, S., Doleshal, P., & Dodge, C. (2001a). A new approach to monitoring exercise training. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 15 (1) : 109-15
- Foster, C., Heimann, K.M., Esten, P.L., Brice, G. & Porcari, J.P. (2001b). Differences in perceptions of training by coaches and athletes. *South African Journal of Sports Medicine*, 8 : 3-7
- Freitas, V.H., Nakamura, F.Y., Miloski, B., Samulski, D. & Bara-Filho, M.G. (2014). Sensitivity of physiological and psychological markers to training load intensification in volleyball players. *Journal of Sports & Science in Medicine*, 13 (3) : 571-9
- Fry, R.W., Morton, A.R., Keast, D. (1991). Overtraining in athletes. An update. *Sports Medicine*, 12 (1) : 32-65

G

- Gabbett, T.J. (2004). Reductions in pre-season training loads reduce training injury rates in rugby league players. *British Journal of Sports Medicine*, 38 (6) : 743 -9
- Gabbett, T.J. & Domrow, N. (2007). Relationships between training load, injury, and fitness in sub-elite collision sport athletes. *Journal of Sports Science*, 25 (13) : 1507-19
- Gabbett, T.J. & Jenkins, D.G. (2011). Relationship between training load and injury in professional rugby league players. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 14 (3) : 204 -9

- García-Pallarés J., Carrasco, L., Díaz, A. & Sánchez-Medina L. (2009) Post-season detraining effects on physiological and performance parameters in top-level kayakers : comparison of two recovery strategies. *Journal of Sports Science & Medicine*, 8 (4) : 622-628
- Garcin, M., Vautier, J.F., Vandewalle, H., Wolff, M. & Monod, H. (1998). Ratings of Perceived Exertion (RPE) during cycling exercises at constant power output. *Ergonomics*, 41 (10) : 1500-9
- Garcin, M. & Billat, V. (2001). Perceived exertion scales attest to both intensity and exercise duration. *Perceptual and Motor Skills*, 93 (3) : 661-71
- Garcin, M., Coquart, J.B., Robin, S. & Matran, R. (2011). Prediction of time to exhaustion in competitive cyclists from a perceptually based scale. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 25 (5) : 1393-9
- Gaskill, S.E., Serfass, R.C., Bacharach, D.W. & Kelly, J.M. (1999). Responses to training in cross-country skiers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 31 (8) : 1211-7
- Gastin, P.B., Fahrner, B., Meyer, D., Robinson, D. & Cook, J.L. (2013). Influence of physical fitness, age, experience, and weekly training load on match performance in elite Australian football. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 27 (5) : 1272-9
- Giacomini, M., Bernard, T., Gavarry, O., Altare, S. & Falgairette, G. (2000). Influence of the menstrual cycle phase and menstrual symptoms on maximal anaerobic performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32 (2) : 486-92
- Ginies, P., Bannwarth, B., Duquesnoy, B., Guillemin, F., Perrot, S., Richard, A. & Verdoncq, B. (2005). Étude de validation d'une échelle visuelle analogique électronique (EVE) de mesure de l'intensité de la douleur, par comparaison à une échelle visuelle analogique traditionnelle (EVA). *Douleur et analgésie*, 18 (1) : 39-41
- Glance, B.W., Kremenik, I.J. & McHugh, M.P. (2013). Sex differences in central and peripheral mechanisms of fatigue in cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 113 (4) : 1091-8
- Glatthorn J.F., Gouge, S., Nussbaumer, S., Stauffacher, S., Impellizzeri, F.M. & Maffiuletti, N.A. (2011). Validity and reliability of Optojump photoelectric cells for estimating vertical jump height. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 25 (2) : 556-60
- Goldbeter, A. (2002). Computational approaches to cellular rhythms. *Nature*. 420 : 238-245.
- Gomez-Piriz, P.T., Jiménez-Reyes, P. & Ruiz-Ruiz, C. (2011). Relation between total body load and session rating of perceived exertion in professional soccer players. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 25 (8) : 2100-3

- Gonzalez-Alonso, J., Mora-Rodriguez, R., Below, P.R. & Coyle, E.F. (1997). Dehydration markedly impairs cardiovascular function in hyperthermic endurance athletes during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 82 (4) : 1229-36
- Gorostiaga, E.M., Walter, C.B., Foster, C. & Hickson, R.C. (1991) Uniqueness of interval and continuous training at the same maintained exercise intensity. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 63 (2) : 101-7
- Granados, C., Izquierdo, M., Ibanez, J., Ruesta, M. & Gorostiaga, E.M. (2013). Are there any differences in physical fitness and throwing velocity between national and international elite female handball players ? *Journal of Strength Conditioning & Research*, 27 (3) : 723 : 32
- Grappe, F., Grolambert, A. & Rouillon, J.D. (1999). Quantification des charges d'entraînement en cyclisme en fonction d'une échelle d'estimation subjective de l'intensité de l'exercice (échelle d'ESIE). *VIIIème Congrès International de l'ACAPS, Macolin, Suisse*
- Gros Lambert, A. & Mahon, D. (2006). Perceived exertion : influence of age and cognitive development. *Sports Medicine*, 36 (11) : 911-28

H

- Hagin, V., Gonzales, B.R., Candau, R.B. & Gros Lambert, A. (2012). Influence of a conservative sleep management strategy during a solo Pacific Ocean crossing on anxiety and perceived fatigue : a case study. *Journal of Sport Science*, 30 (4) : 395-402
- Halson, S.L., Bridge, M.W., Meeusen, R., Busschaert, B., Gleeson, M., Jones, D.A. & Jeukendrup, A.E. (2002). Time course of performance changes and fatigue markers during intensified training in trained cyclists. *Journal of Applied Physiology*, 93 (3) : 947-956
- Halson, S.L. (2014). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Medicine*, 44 Suppl 2 : S139-47
- Harrison, A.J. & Moroney, A. (2007). *Arm augmentation of vertical jump performance in young girls and adult females*. 25 International Symposium on Biomechanics in Sports
- Hauswirth, C., Jouis, J., Aubry, A., Bonnet, G. Duffield, R. & Le Meur, Y. (2014). Evidence of disturbed sleep and increased illness in overreached endurance athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 46 (5) : 1036-45
- Hayes, P., & Quinn, M. (2009). A mathematical model for quantifying training. *European Journal of Applied Physiology*, 106 (6) : 839-847
- Heisterberg, M.F., Fahrenkrug, J., Krstrup, P., Storskov, A., Kjær, M. & Andersen, J.L.

- (2013). Extensive monitoring through multiple blood samples in professional soccer players, *Journal of Strength & Conditioning Research*, 27 (5) : 1260-71
- Hellard, P., Avalos, M., Millet, G., Lacoste, L., Barale, F. & Chatard, J.C. (2005). Modeling the residual effects and threshold saturation of training : a case study of Olympic swimmers. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 19 (1) : 67-75
- Hellard, P., Avalos, M., Lacoste, L., Barale, F., Chatard, J. C. & Millet, G.P. (2006). Assessing the limitations of the Banister model in monitoring training. *Journal of Sports Sciences*, 24 (5) : 509-20
- Hellard, P., Avalos, M., Hausswirth, C., Pyne, D., Toussaint, J.F. & Mujika, I. (2013). Identifying optimal overload and taper in elite swimmers over time. *Journal of Sports Science & Medicine*, 12 (4) : 668-78
- Herman, L., Foster, C., Maher, M.A., Mikat, R.P. & Porcari, J.P. (2006). Validity and reliability of the session RPE method for monitoring exercise training intensity. *South African Journal of Sports Medicine*, 18 (1) : 14-17
- Hohmann, A., Edelmann-Nusser, J. & Henneberg, B. (2000). *A nonlinear approach to the analysis and modeling of training and adaptation in swimming*. 18th International Symposium on Biomechanics in Sports
- Homery, D.J, Farrow, D., Mujika, I. & Young, W. (2007). Fatigue in tennis : mechanisms of fatigue and effect on performance. *Sports Medicine*, 37 (3) : 199-212
- Hoogeveen, A.R. (2000). The effect of endurance training on the ventilatory response to exercise in elite cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 82 (1-2) : 45-51
- Hooper, S.L., Mackinnon, L.T., Howard, A., Gordon, R.D. & Backmann, A.W. (1995). Markers for monitoring overtraining and recovery. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 27 (1) : 106-12
- Hooper, S.L. & Mackinnon, L.T. (1995). Monitoring overtraining in athletes. Recommendations. *Sports Medicine*, 20 (5) : 321-7
- Hooper, S.L., Mackinnon, L.T. & Hanrahan, S. (1997). Mood states as an indication of staleness and recovery. *International Journal of Sport Psychology*, 28 (1) : 1-12
- Hooper, S.L., Mackinnon, L.T. & Howard, A. (1999). Physiological and psychometric variables for monitoring recovery during tapering for major competition. *Medicine & Science in Sports Exercise*, 31 (8) : 1205-10
- Hopkins, W.G., Edmond, I.M., Hamilton, B.H., Macfarlane, D.J. & Ross, B.H. (1989). Relation between power and endurance for treadmill running of short duration. *Ergonomics*, 32 (12) : 1565 -1571
- Hopkins, W.G. (2010). Linear models and effect magnitudes for research, clinical and practical applications. *Sports Science*, 14 : 49-57

Hornsby, J.H., Green, J.M., O'Neal, E.K., Killen, L.L., McIntosh, J.R. & Coates, T.E. (2013). Influence of terminal RPE on session RPE. *Journal of Strength Conditioning & Research*, 27 (10) : 2800-5

Huskisson, E.C. (1974). Measurement of pain. *Lancet*, 2 (7889) : 1127-31

I

Impellizzeri, F.M., Rampinini, E., Coutts, A.J., Sassi, A. & Marcora, S.M. (2004). Use of RPE-based training load in soccer. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36 (6) : 1042-7

Issurin, V.B. (2008). Block periodization versus traditional training theory : a review. *Journal of Sports Medicine & Physical Fitness*, 48 (1) : 65-75

Issurin, V.B. (2010). New horizons for the methodology and physiology of training periodization. *Sports Medicine*, 40 (3) : 189-206

J

Jennings, D., Cormack, S., Coutts, A., Boyd, L.J. & Aughey, R.J. (2010). Variability of GPS units for measuring distance in team sport movements. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 5 (4) : 565-9

Janse de Jonge, X.A. (2003). Effects of the menstrual cycle on exercise performance. *Sports Medicine*, 33 (11) : 833-51

Johnston, R.D., Gibson, N.V., Twist, C., Gabbett, T.J., MacNay, S.A. & MacFarlane, N.G. (2013) Physiological responses to an intensified period of rugby league competition. *Journal of Strength Conditioning & Research*, 27 (3) : 643-54

Juliff, L.E., Halson, S.L. & Peiffer, J.J. (2014). Understanding sleep disturbance in athletes prior to important competitions. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 18 (1) : 13-8

K

Kang, J., Chaloupka E.C., Biren G.B., Mastrangelo M.A. & Hoffman J.R. (2009). Regulating intensity using perceived exertion : effect of exercise duration. *European Journal of Applied Physiology*, 105 (3) : 445-51

Karlsson, J. & Saltin, B. (1971). Oxygen deficit and muscle metabolites in intermittent exercise. *Acta Physiologica Scandinavica*, 82 (1) : 115-22

- Kawamori, N. & Haff, G.G. (2004). The optimal training load for the development of muscular power. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 18 (3) : 675-84
- Kellmann, M. & Günther, K.D. (2000). Changes in stress and recovery in elite rowers during preparation for the Olympic Games. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32 (3) : 673-83
- Kellmann, M., & Kallus, K.W. (2001). *Recovery-Stress Questionnaire for athletes : User manual*. Champaign, IL. Human Kinetics
- Kellmann, M. (2010). Preventing overtraining in athletes in high-intensity sports and tress/recovery monitoring. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20 (Suppl 2) : 95-102
- Kelly, V.G. & Coutts, A.J. (2007). Planning and Monitoring Training Loads During the Competition Phase in Team Sports. *Strength and Conditioning Journal*, 29 (8) : 32-37
- Kempf, C., Bertin, P. & Joly-Leblond, C. (2001). Mesure de l'intensité douloureuse à l'aide d'une échelle visuelle analogique sur micro-ordinateur de poche. *Douleur*, 2 (5) : 221-225
- Kempton, T. & Coutts, A.J. (2014). Physical and technical demands of rugby 9's tournament match-play : a preliminary study. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 5
- Kenttä, G., Hassmen, P. & Raglin, J.S. (2001). Training practices and overtraining syndrome in Swedish age-group athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 22 (6) : 460-5
- Kenttä, G., Raglin, J. S., Hassme, P. & Hassmén, P. (2006). Mood state monitoring of training and recovery in elite kayakers. *European Journal of Sport Science*, 6 (4) : 245 -253
- Khairullah, A., Klein, L.C., Ingle, S.M., May, M.T., Whetzel, C.A., Susman, E.J. & Paus, T. (2014). Testosterone trajectories and reference ranges in a large longitudinal sample of male adolescents. *PloS One*, 9 (9) : e108838

L

- Lacour, J.R., Bouvat, E. & Barthélémy, J.C. (1990). Post-compétition blood lactate concentrations as indicators of anaerobic energy expenditure during 400 m and 800 m races. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 61 (3-4) : 172-6
- Lamberts, R.P., Swart, J., Capostagno, B., Noakes, T.D. & Lambert, M.I. (2010). Heart rate recovery as a guide to monitor fatigue and predict changes in performance parameters. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20 (3) : 449-57

- Lane, A.M., Terry, P.C., Beedie, C.J., Curry, D.A. & Clark, N. (2001). Mood and performance : test of a conceptual model with a focus on depressed mood. *Psychology of Sport & Exercise*, 2 (3), 157-72.
- Lapole, T., Ahmaidi, S., Gaillien, B. & Leprêtre P.M. (2013). Influence of dorsiflexion shoes on neuromuscular fatigue of the plantar flexors after combined tapping-jumping exercises in volleyball players. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 27 (7) : 2025-33
- Laureys, S., Peigneux, P., Perrin, F. & Maquet, P. (2002). Sleep and motor skill learning. *Neuron*, 35 (1) : 5-7
- Lastella, M., Roach, G.D., Halson, S.L., Martin, D.T., West, N.P., Sargent, C. (2014a). Sleep/wake behaviour of endurance cyclists before and during competition. *Journal of Sports Science*, 33 (3) : 293-9
- Lastella, M., Roach, G.D., Halson, S.L., Sargent, C. (2014b). Sleep/wake behaviour of elite athletes from individual and team sports. *European Journal of Sport Science*, 15 (2) : 94-100
- Laursen, P.B. & Jenkins, D.G. (2002). The scientific basis for high-intensity interval training : optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Medicine*, 32 (1) : 52-73
- Laursen, P.B. (2010). Training for intense exercise performance : high-intensity or high-volume training ? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20 (Suppl : 2) : 1-10
- Le Gallais, D. & Millet, G. (2007). *La préparation physique. Optimisation et limites de la performance sportive*. Belgique. Masson.
- Leifke, E., Gorennoi, V., Wichers, C., Von Zur Mühlen, A., Von Büren, E. & Brabant, G. (2000). Age-related changes of serum sex hormones, insulin-like growth factor-1 and sex-hormone binding globulin levels in men : cross-sectional data from a healthy male cohort. *Clinical Endocrinology*, 53 (6) : 689-95
- Lidor, R. & Ziv, G. (2010). Physical and physiological attributes of female volleyball players - a review. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 24 (7) : 1963-73
- Liederbach, M., Gleim, G.W. & Nicholas, J.A. (1992). Monitoring training status in professional ballet dancers. *Journal of Sports Medicine & Physical Fitness*, 32 (2) : 187-95
- Lucia, A., Hoyos, J., Santalla, A., Earnest, C. & Chicharro, J.L. (2003). Tour de France versus Vuelta a Espana : which is harder ? *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35 (5) : 872-8

M

- Malisoux, L., Frisch, A., Urhausen, A., Seil, R. & Theisen, D. (2013). Monitoring of sport participation and injury risk in young athletes. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 16 (6) : 504-8
- Malousaris, G.G., Bergeles, N.K., Barzouka, K.G., Bayios, I.A., Nassis, G.P. & Koskolou, M.D. (2008). Somatotype, size and body composition of competitive female volleyball players. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 11 (3) : 337-44
- Manno, R. (1989). *Les bases de l'entraînement sportif*. Paris. Editions Revue EPS
- Manzi, V., D'Ottavio, S., Impellizeri, F.M., Chaouachi, A., Chamari, K. & Castagna, C. (2010). Profile of weekly training load in elite male professional basketball players. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 24 (5) : 1399-406
- Marcelino, R., Mesquita, I. & Sampaio. (2011). Effects of quality of opposition and match status on technical and tactical performances in elite volleyball. *Journal of Sports Sciences*, 29 (7) : 733-741
- Marcora, S. (2010). Counterpoint : Afferent feedback from fatigued locomotor muscles is/is not an important determinant of endurance exercise performance. *Journal of Applied Physiology*, 108 (2) : 454-6
- Markovic, G., Dizdar, D., Jukic, I. & Cardinale, M. (2004). Reliability and factorial validity of squat and countermovement jump tests. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 18 (3) : 551-5
- Marques, M.C., Tillaar, R.v., Vescovi, J.D. & González-Badillo, J.J. (2008). Changes in strength and power performance in elite senior female professional volleyball players during the in-season : a case study. *Journal of Strength Conditioning & Research*, 22 (4) : 1147-55
- Marques, M.C., van den Tillaar, R., Gabbett, T.J., Reis, V.M. & González-Badillo, J.J. (2009). Physical fitness qualities of professional volleyball players : determination of positional differences. *Journal of Strength Conditioning and Research*, 23 (4) : 1106-11
- Martin, A., Andersen, M.B., Gates, W. (2000). Using the Profile of Mood States (POMS) to monitor high-intensity training in cyclists : group versus case studies. *The Sport Psychologist*, 14 : 138-56
- Martin-Matillas M., Valadés D., Hernández-Hernández E., Olea-Serrano F., Sjöström M., Delgado-Fernández M. & Ortega F.B. (2013). Anthropometric, body composition and somatotype characteristics of elite female volleyball players from the highest Spanish league. *Journal of Sport Science*, 32 (2) : 137-48
- Matveiev, L.P. (1980). *Les bases de l'entraînement*. Paris. Editions Vigot
- Matveiev, L.P. (1983). *Les aspects fondamentaux de l'entraînement*. Paris. Editions Vigot
- McCall, A., Davison, M., Andersen, T. E., Beasley, I., Bizzini, M., Dupont, G., Duffield,

- R., Carling, C. & Dvorak, J. (2015). Injury prevention strategies at the FIFA 2014 World Cup : perceptions and practices of the physicians from the 32 participating national teams. *British Journal of Sports Medicine*, 49 (9), 603–8.
- McGregor, S. (2008a). Running Training Stress Score (rTSS). *Site TrainingPeaks* (en ligne). <http://home.trainingpeaks.com/blog/article/running-training-stress-score-rtss-explained>. Page consultée le 1 octobre 2013.
- McGregor, S. (2008b). What is Normalized Graded Pace ? *Site TrainingPeaks* (en ligne). <http://home.trainingpeaks.com/blog/article/what-is-normalized-graded-pace>. Page consultée le 1 octobre 2013.
- McLean, B.D., Coutts, A.J., Kelly, V., McGuigan, M.R. & Cormack, S.J. (2010). Neuromuscular, endocrine, and perceptual fatigue responses during different length between-match microcycles in professional rugby league players. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 5 (3) : 367-83.
- McNair, D. M., Lorr, M., & Droppleman, L. F. (1971). *Manual for the Profile of Mood States*. San Diego, CA. Educational and Industrial Testing Services
- Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., Raglin, J., Rietjens, G., Steinacker, J. & Urhausen, A. (2013). Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome : joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Medicine & Science in Sports & Exercice*, 45 (1) : 186-205
- Meney, I., Waterhouse, J., Atkinson, G., Reilly, T. & Davenne, D. (1998). The effect of one night's sleep deprivation on temperature, mood, and physical performance in subjects with different amounts of habitual physical activity. *Chronobiology International*, 15 (4) : 349-63
- Mester, J. & Perl, J. (1999). Unconventional Simulation and Empirical Evaluation of Biological Response to Complex High-Training Loads, in *Sport Science '99 in Europe*, University Institute of Motor Science, Rome, 1999, p. 163.
- Milanez, V.F., Spiguel-Lima, M.C., Gobatto, C.A., Perandini, L.A., Nakamura, F.Y. & Ribeiro, L.F.P. (2011). Correlates of session-rating of perceived exertion (RPE) in a karate training session. *Science & Sports*, 26 (1) : 38-42
- Milanez, V.F., Ramos, S.P., Okuno, N.M., Boullosa, D.A. & Nakamura F.Y. (2014). Evidence of a Non-Linear Dose-Response Relationship between Training Load and Stress Markers in Elite Female Futsal Players. *Journal of Sports Science & Medicine*, 13 (1) : 22-9
- Miller, B.F., Fattor, J.A., Jacobs, K.A., Horning, M.A., Navazio, F., Lindinger, M.I. & Brooks, G.A. (2002a). Lactate and glucose interactions during rest and exercise in men : effect of exogenous lactate infusion. *Journal of Physiology*, 544 (Pt 3) : 963-75
- Miller, B.F., Fattor, J.A., Jacobs, K.A., Horning, M.A., Suh, S.H., Navazio F. & Brooks G. (2002b). Metabolic and cardiorespiratory responses to 'the lactate clamp'. *American*

- Millet, G.P., Candau, R.B., Barbier, B., Busso, T., Rouillon, J.D. & Chatard, J.C. (2002). Modelling the transfers of training effects on performance in elite triathletes. *International Journal of Sports Medicine*, 23 (1) : 55-63.
- Minganti, C., Capranica, L., Meeusen, R. & Piacentini, M. F. (2011). The use of session-RPE method for quantifying training load in diving. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 6 (3) : 408-18.
- Moir, G., Shastri, P. & Connaboy, C. (2008). Intersession reliability of vertical jump height in women and men. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 22 (6) : 1779-84
- Monteiro, A.G., Aoki, M.S., Evangelista, A.L., Alveno, D.A., Monteiro, G.A., Piçarro Ida, C. & Urrinowitsch, C. (2009). Nonlinear periodization maximizes strength gains in split resistance training routines. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 23 (4) : 1321-6
- Moreira, A., de Moura, N.R., Coutts, A., Costa, E.C., Kempton, T. & Aoki, M.S. (2013). Monitoring internal training load and mucosal immune responses in futsal athletes. *Journal of Strength & Conditioning Research*. 27 (5) : 1253-9
- Morin, S., Ahmaidi, S. & Leprêtre P.M. (2014). Modélisation des effets de l'entraînement : revue des différentes études. *Science & Sport*, 29 (5) : 237-47
- Morton, R.H., Fitz-Clarke, J. R., & Banister, E. W. (1990). Modeling human performance in running. *Journal of Applied Physiology*, 69 (3) : 1171-7
- Morton, R.H. (1996). A 3-parameter critical power model. *Ergonomics*, 39 (4) : 611-9
- Morton, R.H. (1997). Modeling training and overtraining. *Journal of Sports Sciences*, 15 (3) : 335-40
- Mujika, I., Chatard, J.C., Busso, T., Geysant, A., Barale, F. & Lacoste, L. (1995). Effects of training on performance in competitive swimming. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 20 (4) : 395-406
- Mujika, I., Busso, T., Lacoste, L., Barale, F., Geysant, A. & Chatard, J.C. (1996). Modeled responses to training and taper in competitive swimmers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 28 (2) : 251-8
- Mujika, I. (1998). The influence of training characteristics and tapering on the adaptation in highly trained individuals : a review. *International Journal of Sports Medicine*, 19 : 439 -446
- Mujika, I., & Padilla, S. (2000, a). Detraining : loss of training-induced physiological and performance adaptations. Part I : short term insufficient training stimulus. *Sports Medicine*, 30 : 79 -87
- Mujika, I., & Padilla, S. (2000, b). Detraining : loss of training-induced physiological and

performance adaptations. Part : II : long term insufficient training stimulus. *Sports Medicine*, 30 : 145-154

Mujika, I., & Padilla, S. (2001). Muscular characteristics of detraining in humans. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33 (8), 1297 -303.

Mujika, I., & Padilla, S. (2003). Scientific bases for precompetition tapering strategies. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35 (7), 1182 -7.

Mujika, I. (2010). Intense training : the key to optimal performance before and during the taper. *Scandinavian Journal of Medicine in Science and Sports*, 20 (Supp : 2) : 24-31

N

Narisawa, H. (2013). Anxiety and its related factors at bedtime are associated with difficulty in falling asleep. *Tohoku Journal of Experimental Medicine*, 231 (1) : 37-43

Neal, C.M., Hunter, A.M., Brennan, L., O'Sullivan, A., Hamilton, D.L., De Vito, G. & Galloway, S.D. (2013). Six weeks of a polarised training intensity distribution leads to greater physiological and performance adaptations than a threshold model in trained cyclists. *Journal of Applied Physiology*, 114 (4) : 461-71

Neary, J.P., McKenzie, D.C. & Bhambhani, Y.N. (2005). Muscle oxygenation trends after tapering in trained cyclists. *Dynamic Medicine*, 4 (1) : 4.

Neufer, P.D., Costill, D.L., Fielding, R.A., Flynn, M.G. & Kirwan, J.P. (1987). Effect of reduced training on muscular strength and endurance in competitive swimmers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 19 (5) : 486-490

O

O'Connor, P.J., Morgan, W.P. Raglin, J.S., Barksdale, C.N. & Kalin, N.H. (1989). Mood state and salivary cortisol levels following overtraining in female swimmers. *Psychoneuroendocrinology*, 14 (4) : 303-10

O'Connor, P.J., Morgan, W.P. & Raglin, J.S. (1991). Psychobiologic effects of 3d of increased training in female and male swimmers. *Medicine in Science & Sports Exercise*, 23 (9) : 1055-61

Odagiri, Y., Shimomitsu, T., Iwane, H. & Katsumura, T. (1996). Relationships between exhaustive mood states and changes in stress hormones following an ultraendurance race. *International Journal of Sports Medicine*, 17 (5) : 325-31

P

- Palao, J.M. & Valades, D. (2012). Validity of the standing spike as a monitoring protocol for female volleyball players. *Biology of sport*, 29 (4) : 281-284
- Perandini, L.A., Siqueira-Pereira, T.A., Okuno, N.M., Soares-Caldeira, L.F. & Nakamura, F.Y. (2012). Use of session RPE to training load quantification and training intensity distribution in taekwondo athletes. *Science & Sports*, 27 (4) : 25-30
- Perl, J. (2000). *Antagonistic Adaptation Systems : An Example of How to Improve Understanding and Simulating Complex System Behaviour by Use of Meta-Models and On Line-Simulation*. Proceedings of the MACS, Lausanne.
- Perl, J. (2001a). PerPot : A Metamodel for Simulation of Load Performance Interaction. *European Journal of Sport Science* 1.2
- Perl, J. (2001b). PerPot : On an antagonistic metamodel and its applications to dynamic adaptation systems. *Proceedings of the 6th Annual Congress of the ECSS*, 248
- Perl, J. (2002). Adaptation, Antagonism, and System Dynamics. In : *Perspectives - The Multidisciplinary Series of Physical Education and Sport Science*, 4 : 105-125
- Perl, J., Dauscher, P. & Hawlitzky, M. (2003). On the long term behaviour of the Performance-Potential-Metamodel PerPot. *International Journal on Computer Science in Sport, Special Edition* : 12-21
- Pfeiffer, M. (2008). Modeling the Relationship between Training and Performance-A Comparison of Two Antagonistic Concepts. *International Journal of Computer Science in Sport*, 7 (2) : 13-32
- Philip, P., Sagaspe, P., Moore, N., Taillard, J., Charles, A., Guilleminault, C. & Bioulac, B. (2005). Fatigue, sleep restriction and driving performance. *Accident Analysis and Prevention*, 37 (3) : 473-8
- Piacentini, M.F. & Meeusen, R. (2014). An Online Training Monitoring System to Prevent Non Functional Overreaching. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 10 (4) : 524-7
- Piéron, H. (1979). *Vocabulaire de psychologie*. Paris. PUF
- Pierce, E.F. (2002). Relationship between training volume and mood states in competitive swimmers during a 24-week season. *Perceptual & motor skills*, 94 (3 Pt 1) : 1009-12.
- Piggott, B., Newton, M. J. & McGuigan, M. R. (2009). The relationship between training load and incidence of injury and illness over a pre-season at an Australian football league club. *Journal of Australian Strength & Conditioning*, 17 (3), 4-17
- Poussel, M., Laure, P., Genest, J., Fronzaroli, E., Renaud, P. Favre, A. & Chenuel, B. (2014). Sleep and academic performance in young elite athletes. *Archives de Pédiatrie*, 21 (7) : 722-6

- Préfaut, C. & Masse-Biron, J. (1989). Aptitude physique aérobie et vieillissement. *Science & Sports*, 4 (3) : 185-91
- Prestes, J., Frollini, A.B., de Lima, C., Donatto, F.F., Foschini, D., de Cássia Marqueti, R., Figueira, A. Jr. & Fleck, S.J. (2009). Comparison between linear and daily undulating periodized resistance training to increase strength. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 23 (9) : 2437-42
- Portas, M.D., Harley, J.A., Barnes, C.A. & Rush, C.J. (2010). The validity and reliability of 1-Hz and 5-Hz global positioning systems for linear, multidirectional, and soccer-specific activities. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 5 (4) : 448-58
- Psycharakis, S.G. (2011). A longitudinal analysis on the validity and reliability of ratings of perceived exertion for elite swimmers. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 25 (2) : 420-26

Q

- Quinn, T.J., Klooster, J.R. & Kenefick, R.W. (2006). Two short, daily activity bouts vs one long bout : are health and fitness improvements similar over twelve and twenty-four weeks ? *Journal of Strength & Conditioning Research*, 20 (1) : 130-5

R

- Raglin, J.S., Morgan, W.P. & Luchsinger, A.E. (1990). Mood and self motivation in successful and unsuccessful female rowers. *Medicine & Science in Sports Exercise*, 22 (6) : 849-53
- Raglin, J.S. (2001). Psychological factors in sport performance : the Mental Health Model revisited. *Sports Medicine*, 31 (12) : 875-90
- Rakotomalala, E. (2005). "TANAGRA : un logiciel gratuit pour l'enseignement et la recherche", in Actes de EGC'2005, RNTI-E-3, vol. 2 : 697-702
- Rakotomalala, E. (2007). VARCLUS : Didacticiel - Etude de cas. *Site Tanagra*. http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/tanagra/fichiers/fr_Tanagra_VarClus.pdf
- Reilly, T. & Deykin, T. (1983). Effects of partial sleep loss on subjective states, psychomotor and physical performance tests. *Journal of Human Movement Studies*. 9 : 157-70
- Reilly, T., Atkinson, G., Edwards, B., Waterhouse, J., Farrelly, K. & Fairhurst, E. (2007). Diurnal variation in temperature, mental and physical performance, and tasks specifically related to football (soccer). *Chronobiology International*. 24 (3) : 507-19.

- Rhea, M.R., Ball, S.D., Phillips, W.T. & Burkett, L.N. (2002). A comparison of linear and daily undulating periodized programs with equated volume and intensity for strength. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 16 (2) : 250-5
- Robey, E., Dawson, B., Halson, S., Gregson, W., Goodman, C. & Eastwood P. (2014). Sleep quantity and quality in elite youth soccer players : a pilot study. *European Journal of Sport Science*, 14 (5) : 410-7
- Ronglan, L.T., Raastad, T. & Borgeson, A. (2006). Neuromuscular fatigue and recovery in elite female handball players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 16 (4) : 267-273
- Rønnestad, B.R., Ellefsen, S., Nygaard, H., Zacharoff, E.E., Vikmoen, O., Hansen, J. & Hallén, J. (2012a) Effects of 12 weeks of block periodization on performance and performance indices in well-trained cyclists. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 24 (2) : 327-35
- Rønnestad, B.R., Hansen, J. & Ellefsen, S. (2012b). Block periodization of high-intensity aerobic intervals provides superior training effects in trained cyclists. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 24 (1) : 34-42
- Roy, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris. Economica
- Russel, M. & Kingsley, M. (2011). Influence of exercise on skill proficiency in soccer. *Sports Medicine*, 41 (7) : 523-39

S

- Saltin B. (1964). Circulatory response to submaximal and maximal exercise after thermal dehydration. *Journal of Applied Physiology*, 19 (6) : 1125-32
- Samuels, C. (2008). Sleep, Recovery and Performance : the new frontier in high performance athletics. *Neurologic Clinics*, 26 (1) : 169-80
- Sargent, C., Lastella, M., Halson, S.L. & Roach, G.D. (2014). The impact of training schedules on the sleep and fatigue of elite athletes. *Chronobiology International*, 31 (10) : 1160-8
- Sattler, T., Sekulic, D., Hadzic, V., Uljevic, O. & Dervisic, E. (2012). Vertical jumping tests in volleyball : reliability, validity and playing-position specifics. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 26 (6) : 1532-8
- Savage, K.J. & Clarkson, P.M. (2002). Oral contraceptive use and exercise-induced muscle damage and recovery. *Contraception*, 66 (1) : 67-71.
- Scanlan, A.T., Wen, N., Tucker, P.S. & Dalbo, V.J. (2014). The relationship between internal and external training load models during basketball training. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 28 (9) : 2397-405

- Schaal, M., Ransdell, L.B., Simonson, S.R. & Gao, Y. (2013). Physiologic performance test differences in female volleyball athletes by competition level and player position. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 27 (7), 1841-50
- Schmikli, S.L., Brinks, M.S., de Vries, W.R. & Backx, F.J. (2011). Can we detect non-functional overreaching in young elite soccer players and middle-long distance runners using field performance tests. *British Journal of Sports Medicine*, 45 (8) : 631-6
- Scott, J. & Huskisson, E.C. (1979). Vertical or horizontal visual analogue scales. *Annal of the Rheumatic Diseases*, 38 (6) : 560-3.
- Seiler, S. & Kjerland, G.Ø. (2006). Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes : is there evidence for an « optimal » distribution ? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 16 (1) : 49 -56
- Seiler, S. (2010). What is best practice for training intensity and duration distribution in endurance athletes ? *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 5 (3) : 276-91
- Selye, H. (1975). *Le stress de la vie*, Paris. Éditions Galimard
- Sheppard, J.M., Gabett, T., Taylor, K.L., Dorman, J., Lebedew, A.J. & Borgeaud, R. (2007). Development of a repeated-effort test for elite men's volleyball. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 2 (3) : 292-304
- Silva, J.S., Costa, A.M., Oliveira, P.M., Reis, V.M., Saaveda, J., Rouboa, A. & Marinha, D.A. (2007). The use of neural network technology to model swimming performance. *Journal of Sports Science & Medicine*, 6 (1) : 117-25
- Simão, R., Spinetti, J., de Salles, B.F., Matta, T., Fernandes, L., Fleck, S.J., Rhea, M.R. & Strom-Olsen, H.E. (2012). Comparison between nonlinear and linear periodized resistance training : hypertrophic and strength effects. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26 (5) : 1389-95
- Sinding, C. (1993). Les métaphores en biologie : analogies ou outils de pensée ? *Intellectica*, 16 : 85-99
- Singh, F., Foster, C., Tod, D. & McGuigan, M. R. (2007). Monitoring different types of resistance training using session rating of perceived exertion. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 2 (1), 34-45.
- Sinnerton, S. & Reilly, T. (1992). Effects of sleep loss and time of day in swimmers. In : D. McLaren, Reilly T. and Lees A. (eds.) *Biomechanics in Swimming : Swimming Science VI* : E. & F.N. Spon, London : 399-405
- Slinde, F., Suber, C., Suber, L., Edwén, C.E. & Svantesson, U. (2008). Test-retest reliability of three different countermovement jumping tests. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 22 (2) : 640-4

- Smith, D.J., Roberts, D. & Watson, B. (1992). Physical, physiological and performance differences between canadian national team and universiade volleyball players. *Journal of Sports Sciences*, 10 (2) : 131-8
- Smith, D.J. (2003). A framework for understanding the training process leading to elite performance. *Sports Medicine*, 33 (15) : 1103-26
- Souissi, N. & Davenne, D. (2004). Rythmicité biologique circadienne et performances anaérobies. *Movement & Sport Sciences*, 53 (3) : 39-55
- Spieß, A.N. & Neumeyer, N. (2010). An evaluation of R^2 as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research : a Monte Carlo approach. *BMC Pharmacology*, 10 : 6
- Steinacker, J.M., Lormes, W., Kellmann, M., Liu, Y., Reissnecker, S., Opitz-Gress, A., Baller, B., Günther, K., Petersen, K.G., Kallus, K.W., Lehmann, M. & Altenburg, D. (2000). Training of junior rowers before world championships. Effects on performance, mood state and selected hormonal and metabolic responses. *Journal of Sports Medicine & Physical Fitness*, 40 (4) : 327-35
- Stewart, A.M. & Hopkins, W.G. (2000). Seasonal training and performance of competitive swimmers. *Journal of Sports Science*, 18 (11) : 873-84
- Stöggl, T. & Sperlich, B. (2104). Polarized training has greater impact on key endurance variables than threshold, high intensity, or high volume training. *Frontiers in Physiology*, 5 : 33
- Stone, M.H., O'Bryant, H., Garhammer, J., McMillan, J. & Rozenek, R. (1982). A theoretical model of strength training. *Strength & Conditioning Journal*, 4 (4) : 36-39
- Stone, M.H., O'Bryant, H.S., Schilling, B.K., Johnson, R.L., Pierce, K.C., Haff Koch, A.J. & Stone, M.E. (1999). Periodization. Part 1 : Effects of manipulating volume and intensity. *Strength & Conditioning Journal*, 21 (2) : 56-62
- Sultana, F., Brisswalter, J., Lepers, R., Hausswirth, C. & Bernard, T. (2008). Effet de l'âge et du sexe sur l'évolution des performances en triathlon olympique. *Science & Sports*, 23 : 130-5
- Sylta, O., Tonnessen, E. & Seiler, S. (2013). Do elite endurance athletes report their training accurately ? *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 9 (1) : 85-92

T

- Taha, T., & Thomas, S.G. (2003). Systems modelling of the relationship between training and performance. *Sports Medicine*, 33 (14) : 1061 -73

- Tanaka, H. & Seals, D.R. (1997). Age and gender interactions in physiological functional capacity : insight from swimming performance. *Journal of Applied Physiology*, 82 (3) : 846-851
- Teo, W., Newton, M.J. & McGuigan, M.R. (2011). Circadian rhythms in exercise performance : Implications for hormonal and muscular adaptation. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 10 (4) : 600-6
- Thomas, L. & Busso, T. (2005). A theoretical study of taper characteristics to optimize performance. *Medicine & Science in Sports & Exercice*, 37 (9) : 1615-21
- Thomas, L., Mujika, I. & Busso, T. (2008). A model study of optimal training reduction pre-event taper in elite swimmers. *Journal of Sports Sciences*, 26 (6) : 643-652
- Thomas, L., Mujika, I. & Busso, T. (2009). Computer simulations assessing the potential performance benefit of a final increase in training during pre-event taper. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 23 (6) : 1729-1736
- Todd, K.H., Funk, K.G., Funk, J.P. & Bonacci, R. (1996). Clinical significance of reported changes in pain severity. *Annals of Emergency Medicine*, 27 (4) : 485-9
- Toering, T.T., Elferink-Gemser, M.T., Jordet, G. & Visscher, C. (2009). Self-regulation and performance level of elite and non elite youth soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 27 (14) : 1509-17
- Tonnessen, E., Sylta, O., Haugen, T.A, Hem, E., Svendsen, I. S. & Seiler, S. (2014). The road to gold : training and peaking characteristics in the year prior to a gold medal endurance performance. *PloS One*, 9 (7) : e101796
- Torrents, C., Balagué, N., Perl, J. & Schöllhorn, W. (2007). Linear and Non-Linear Analysis of the traditional and differential strength Training. *Ugdymas. Kuno Kultura. Sportas (Education. Physical Training. Sport)*, 66 (3)
- Twist, C. & Highton, J. (2013). Monitoring fatigue and recovery in rugby league players. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 8 (5) : 467-74

V

- Vautier, J.F. (1994). *Puissance critique, indice d'endurance du travail dynamique*. Paris. Thèse de Biomécanique et Physiologie du Mouvement de l'Université Paris XI Orsay
- Viljoen, W., Saunders, C. J., Hechter, G. D., Aginsky, K. D. & Millson, H. B. (2010). Training volume and injury incidence in a professional rugby union team. *South African Journal of Sports Medicine*, 21 (3) : 97-101
- Viru, M., Hackney, A.C., Karelson, K., Janson, T., Kuus, M. & Viru, A. (2010). Competition effects on physiological responses to exercise : performance,

cardiorespiratory and hormonal factors. *Acta Physiologica Hungarica*, 97 (1) : 22-30

W

- Wakayoshi, K., Yoshida, T., Ikuta, Y., Mutoh, Y. & Miyashita, M. (1993). Adaptations to six months of aerobic swim training. Changes in velocity, stroke rate, stroke length and blood lactate. *International Journal of Sports Medicine*, 14 (7) : 368-72
- Wallace, L.K., Slattery, K.M. & Coutts, A.J. (2009). The ecological validity and application of the session-RPE method for quantifying training loads in swimming. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 23 (1) : 33 -38
- Wallace, L.K., Slattery, K.M. & Coutts, A.J. (2013). A comparison of methods for quantifying training load : relationships between modelled and actual training responses. *European Journal of Applied Physiology*, 114 (1) : 11-20
- Walsh, M.S., Bohm, H., Butterfield, M.M. & Santhosam, J. (2007). Gender bias in the effects of arms and countermovement on jumping performance. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 21 (2) : 362-6
- Weineck, J. (1983). *Manuel d'entraînement*. Paris. Editions Vigot
- Werchoschanski J.W. (1985). *L'entraînement efficace*. Paris. PUF. (Œuvre originale : Effectiv trainieren. Moskva. Fiskul'tura i sport. 1985)
- Williams, S., Trewartha, G., Kemp, S. & Stokes, K. (2013). A meta-analysis of injuries in senior men's professional Rugby Union. *Sports Medicine*, 43 (10) : 1043-55
- Winget, C.M., DeRoshia, C.W. & Holley, D.C. (1985). Circadian rhythms and athletic performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 17 (5) : 498-516.
- Wood, R.E., Hayter, S., Rowbottom, D. & Stewart, I. (2005). Applying a mathematical model to training adaptation in a distance runner. *European Journal of Applied Physiology*, 94 (3) : 310-6

Z

- Ziv, G. & Lidor, R. (2010a). Vertical jump in female and male volleyball players : a review of observational and experimental studies. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20, (4) : 556-67
- Ziv, G. & Lidor, R. (2010b). Physical and physiological attributes of female volleyball players - a review. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 24 (7) : 1963-73

PUBLICATIONS - VALORISATIONS

Revue à comité de lecture

- Morin, S., Lepretre, P.M., Ahmaidi, S. (2014) Modélisation des effets de l'entraînement : revue des différentes études. *Science & Sports*, 29 (5) : 237–247
- Morins, S. Lepretre, P.M., Ahmaidi, S. (2015) Competition calendar and Strength – Aerobic Training Sessions Interaction : The Brainteaser of Coach to Manage Training Schedule in Elite Team Sport Athletes. *Journal of Athletic Enhancement*, 4 :4

Article en révision dans *International Journal of Sport and Performance*

- Morin, S., Lepretre, P.M., Ahmaidi, S. Relevance of Damped Harmonic Oscillation for Modelling the Training Effects on Performance in Elite Female Volley Ball Players

Congrès

- Morin, S., Lepretre, P.M., Ahmaidi, S. : Conception d'un outil ergonomique de quantification et de suivi de la charge d'entraînement dans les sports collectifs. *14e congrès de l'ACAPS. Rennes. 2011* (Poster)
- Morin, S., Raoul, J. : Quantification de la charge d'entraînement dans un pôle espoir fédéral de football. *Congrès de l'Association des Chercheurs Francophones en Football. Rennes, 2012.* (Communication orale)
- Morin, S., Lepretre, P.M., Ahmaidi, S. : Intérêt des oscillations harmoniques amorties pour modéliser les effets de l'entraînement sur la capacité de performance quotidienne du sportif : application au volley-ball professionnel. *16e congrès de l'ACAPS. Nantes. 2015.* (Communication orale)

Colloque

- Morin, S. : Conception d'un système informatique ergonomique pour la quantification et le suivi de la charge d'entraînement dans le sport de haut niveau. *5e colloque Sport et Recherche en Pays de la Loire. Laval. 2013*

Société

- Création de la société Trainingload Pro le 1 septembre 2014.
Kbis : 803 757 855 RCS Nantes



Disponible en ligne sur
ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France
EM|consulte
www.em-consulte.com



MISE AU POINT

Modélisation des effets de l'entraînement : revue des différentes études



Modeling of training effects: Review of various studies

S. Morin*, S. Ahmaïdi, P.-M. Leprêtre

EA-3300, laboratoire de recherche adaptations physiologiques à l'exercice et réadaptation à l'effort,
UFR-STAPS, université de Picardie Jules-Verne, campus universitaire Le Bailly, allée Paschal-Grousset,
80025 Amiens cedex, France

Reçu le 5 mai 2013 ; accepté le 8 novembre 2013
Disponible sur Internet le 13 mai 2014

MOTS CLÉS

Charge
d'entraînement ;
Modèle ;
Performance ;
Effets de
l'entraînement ;
Technologie

Résumé

Introduction. – Maîtriser les interactions entre entraînement et performance est la préoccupation de tout entraîneur. Des modèles mathématiques existent pour décrire et prédire les effets de l'entraînement sur la performance. Ils postulent que chaque séance augmente l'aptitude et la fatigue et que leur différence détermine le niveau de performance.

Actualités. – Bien qu'existent plusieurs méthodes de quantification de la charge d'entraînement, son calcul consensuel se définit comme le produit du volume et de l'intensité. Les différences se situent dans le choix des marqueurs. Malgré des années de recherche, aucun marqueur unique n'a pu être identifié, tant pour l'aptitude que pour la fatigue, rendant difficile la prédiction du niveau de performance d'un athlète.

Perspectives et projets. – L'évolution continue de l'électronique et des objets communicants peut permettre d'augmenter la quantité de marqueurs quantitatifs et qualitatifs comme le nombre de données nécessaires à la conception et au calibrage individuel des modèles. L'objectif ne serait pas tant de prédire la performance maximale d'un athlète à un moment donné que de déterminer sa capacité de performance en tant que probabilité de pouvoir réaliser un haut niveau de performance.

Conclusion. – L'objectif serait de définir une capacité individuelle d'adaptation globale à l'entraînement pour déterminer des seuils et des stratégies de distribution optimales de la charge, afin d'éviter surmenage, surentraînement et blessure.

© 2014 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.
Adresse e-mail : stephane.morin@univ-nantes.fr (S. Morin).

KEYWORDS

Training load;
Model;
Performance;
Training effects;
Technology

Summary

Introduction. – Controlling interactions between training and performance is the concern of every coach. Mathematical models exist to describe and predict the effects of training on performance. They assume that each session increases the ability and fatigue, and their difference determines the level of performance.

Topics. – Although several methods exist to quantify training load, the consensus calculation is defined as the product of volume and intensity. The differences are found at markers. Despite years of research, no single marker of fitness, of fatigue could be identified to predict the performance.

Future prospects. – The continuing evolution of electronic and communication devices can increase the amount of quantitative and qualitative markers as the number of data required for the design and calibration of individual models. The aim is not so much to predict the maximum performance of an athlete at a given moment to determine its performance capacity as likely to be able to achieve a high level of performance.

Conclusion. – The aim would be to define an individual overall adaptive capacity in training to determine thresholds and optimum strategies to periodize training load in order to avoid overreaching, overtraining and injury.

© 2014 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

1. Introduction

Les effets de l'entraînement sur la performance sont complexes à mesurer et constituent une des problématiques majeures de l'entraînement. L'aptitude d'un sportif à accomplir des performances de haut niveau est la conséquence d'un long processus d'adaptation à l'entraînement [1]. L'efficacité d'une périodisation de l'entraînement repose sur des principes de charge/décharge, souvent empiriques, exposant le sportif à des contraintes toujours plus importantes. Relativement simple pour le débutant, la périodisation de l'entraînement se complexifie avec le niveau d'expertise du sportif. En effet, plus le niveau de pratique sera élevé, plus le sportif devra supporter des charges d'entraînement conséquentes [2], visibles notamment à travers la multiplication du nombre de séances quotidiennes et hebdomadaires [3]. Si le principal effet recherché est le gain de performance, l'augmentation de la charge d'entraînement expose également le sportif expert aux risques de blessures, de surmenage et, dans les cas extrêmes, de surentraînement [4].

Quantifier la charge d'entraînement semble donc d'autant plus important qu'il s'agit pour l'entraîneur d'amener le ou les sportifs dont il a la charge à leur pic de forme aux moments choisis; la quantification de la charge d'entraînement participant alors à la maîtrise et à la prédiction des adaptations du sportif à l'entraînement [5]. Il est donc nécessaire d'y intégrer les interactions entre les successions de périodes de préparation, de compétitions, de récupération et/ou de convalescence et donc de tenir compte de la structuration calendaire des compétitions. En effet, compte tenu des caractéristiques des calendriers des différents sports individuels et collectifs, de l'évolution des enjeux en cours d'année (accession à une division supérieure, maintien ou rétrogradation dans une division inférieure), il est intéressant de s'interroger sur la pertinence des méthodes de quantification de la charge d'entraînement.

Cette revue de la littérature scientifique a comme objectif d'offrir une évaluation critique d'un ensemble d'articles

originaux indexés dans la base de données Medline et d'ouvrages liés à la charge d'entraînement. Il sera énoncé, dans un premier temps, le paradigme commun aux méthodes usuelles et reconnues scientifiquement de quantification de la charge d'entraînement, méthodes qui seront, par la suite, présentées de la manière la plus exhaustive possible. S'il paraît difficile d'appliquer, pour une pratique de haut niveau, un seul et même modèle de quantification aux différents sports, il conviendra de développer les apports et limites des différents modèles pour montrer leur adéquation à une, à plusieurs ou à toutes les pratiques sportives compétitives de haut niveau. Enfin il sera proposé un certain nombre de recommandations quant à l'utilisation et l'optimisation de la quantification de la charge d'entraînement chez des sportifs de haut niveau. Pour des niveaux similaires de performance, il est supposé que le nombre et les différentes durées des périodes de compétitions (c'est-à-dire, de quelques semaines en athlétisme à plusieurs mois pour les sports collectifs), et des périodes de préparation nécessitent un ajustement du modèle de quantification de la charge d'entraînement par la prise en compte et la pondération de différents marqueurs objectifs et subjectifs évalués.

2. Paradigme de la quantification de la charge d'entraînement

La charge d'entraînement est un concept qui représente ce que coûte l'activité pour le sportif qui la pratique. Elle est traditionnellement plus centrée sur l'activité, exprimée en intensité et en durée, que sur le sportif, ce qui fait qu'elle est une mesure objective. Toutefois, elle n'est pas une caractéristique uniquement inhérente à l'exercice, mais plutôt le résultat de l'interaction des exigences de l'activité, des circonstances dans lesquelles sont mobilisées les capacités, et des comportements et perceptions du sportif. La charge d'entraînement est donc l'expression de l'activité du sportif confronté aux exigences de l'entraînement. Elle correspond à l'activité

réelle du sportif et peut donc aussi être une mesure subjective.

La notion de charge d'entraînement nécessite d'être précisée, tant elle constitue le socle de la périodisation de l'entraînement qui vise à pouvoir maîtriser et prédire les adaptations potentielles aux différents entraînements, à gérer les interactions entre les périodes de préparation et les périodes de compétition. Elle permet de définir des limites de sous charge, c'est-à-dire lorsque le sportif ne s'entraîne pas suffisamment pour maintenir son niveau de performance. Mais elle permet surtout de définir des limites de surcharge, c'est-à-dire lorsque les capacités du sportif sont dépassées par le coût que représente l'entraînement et que son état de fraîcheur aux entraînements suivants s'en trouve influencé plus ou moins fortement. Cela conduit à s'interroger sur le niveau optimal de charge spécifique à chaque sportif.

Associée à la notion de coût, la fatigue s'objective, à terme, par une dégradation du niveau de performance. Elle concerne aussi bien le potentiel énergétique et neuromusculaire que les aspects subjectifs tels que le stress ou la motivation, notamment. La fatigue est une conséquence à court, moyen et long terme d'un entraînement s'exprimant par des symptômes objectifs et subjectifs : fluctuations des performances, signes physiologiques d'un déséquilibre homéostatique, modifications de l'humeur. La charge d'entraînement peut alors être envisagée comme l'effort que fait le sportif pour répondre aux exigences de l'entraînement, ce qui implique une évaluation de l'effort quant à la mobilisation de ses capacités et de la motivation pour faire cet effort.

Elle est donc influencée par les paramètres de l'entraînement comme la durée, l'intensité, la récupération et la fréquence des entraînements, mais aussi par les effets différés des entraînements précédents et les limites propres du sportif, c'est-à-dire ses caractéristiques morphologiques, biologiques, et psychoaffectives. Dans cette perspective, Verchoschanski [1] la définit comme la mesure quantitative et qualitative du travail d'entraînement. Elle est alors le plus souvent définie comme le produit d'une durée d'effort et de son intensité. En fonction des exigences des différents sports, toute la problématique se situe dans le choix de marqueurs emblématiques permettant une régulation efficace de la charge tout au long de la saison sportive. Se pose alors le problème de la normalisation des charges d'entraînement d'activités physiques aux caractéristiques énergétiques, neuromusculaires et psychoaffectives différentes, et cela conduit à les transformer le plus souvent en unités arbitraires. Il existe différentes méthodes classées en deux catégories principales : les méthodes basées sur les données physiologiques et les méthodes basées sur les données subjectives.

Les premières représentent des mesures essentiellement quantitatives. La principale difficulté réside dans le fait qu'il est difficile d'établir une relation de cause à effet directe et exclusive entre charge d'entraînement et données physiologiques. La réponse des indicateurs physiologiques peut être aussi quelque peu déphasée par rapport aux entraînements et ces mesures peuvent également être coûteuses à obtenir sur le terrain.

Les secondes représentent des mesures qualitatives qui consistent à demander au sportif d'évaluer lui-même

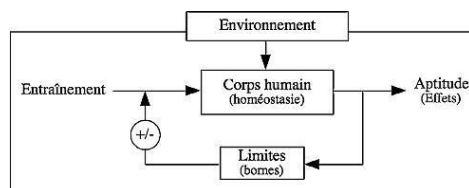


Figure 1 Modèle biocybernétique des effets de l'entraînement.

certain paramètres au moment ou il effectue un entraînement ou tout de suite après. Elles ont pour qualité première d'être adaptables aux différents environnements d'entraînement et d'être peu coûteuses. Les données mesurées varient sensiblement suivant le sportif et l'instant de la collecte.

Bien que complexes, les recherches sur la notion de charge d'entraînement sont d'un intérêt majeur pour la périodisation de l'entraînement pour aider les entraîneurs confrontés à de multiples incertitudes, entre périodisation scientifique rigide et périodisation empirique, entre exigences de fortes charges d'entraînement et exigences de récupération, avec comme alternatives possibles à une performance de haut niveau, le surmenage, le surentraînement et la blessure.

3. Modèles des effets de l'entraînement sur la performance

La très grande majorité des recherches sur les effets de l'entraînement s'inscrivent dans celles des travaux en cybernétique qui consistent à considérer le corps humain comme un système autorégulé. Il ne s'agit pas tant de s'intéresser aux composants qu'à leurs interactions. L'élément central est une «boîte noire» complexe dont on déduit la fonction apparente à partir de l'étude de ses entrées et sorties (Fig. 1).

Tous les modèles utilisent les fonctions de transfert pour tenter de représenter les relations entre le récepteur (c'est-à-dire, les entraînements) et l'émetteur (c'est-à-dire, la performance). Des équations différentielles de différents ordres sont utilisées pour construire des modèles mathématiques des phénomènes biologiques. Dans un modèle biocybernétique, le principe est de considérer que les effets de l'entraînement sont un état non définitif des interactions entre les différents facteurs exogènes et endogènes et qu'elles sont variables dans le temps. Ce qui signifie qu'une même séance d'entraînement ne produit pas les mêmes adaptations chez un même sportif à différentes périodes.

Banister et al. [6] et Calvert et al. [7] sont les premiers à formaliser un modèle qui relie à instant t entraînement $w(t)$, et performance $p(t)$, sur tout le processus d'entraînement (Fig. 2).

Leur modèle est composé de deux équations différentielles de premier ordre : l'aptitude et la fatigue. Une augmentation du niveau d'aptitude influence positivement le niveau de performance alors qu'inversement elle est influencée négativement par l'augmentation du niveau de

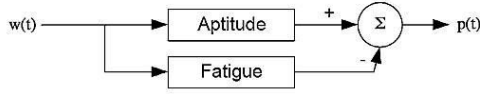


Figure 2 Modèle à deux composantes, Banister et al. [6] et Calvert [7].

fatigue. Dans cette matrice de transfert à trois paramètres, deux portent sur le niveau d'aptitude et un sur le niveau de fatigue. Un produit de convolution de deux fonctions estime le niveau de performance comme le produit d'un entraînement et d'un élément filtrant de premier ordre de type exponentiel qui vise à simuler la cinétique de dissipation retrouvée chez certains marqueurs biologiques humains.

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

où $p(t)$ est le niveau de performance au jour t . $w(t)$ est la charge d'entraînement au jour t . τ_1 , τ_2 sont les constantes de temps associées à l'aptitude. τ_3 est la constante de temps associée à la fatigue et $K (=2,0)$ le coefficient de fatigue.

Ce modèle a été utilisé dans des recherches sur la course [4], la natation [6,8], l'haltérophilie [9], ou le lancer de marteau [10]. Morton et al. [8,11] le simplifient en ne conservant qu'un paramètre d'aptitude et un paramètre de fatigue et, mais y intègrent la durée de la récupération entre deux séances. Chaque composant est pondéré par une constante, respectivement k_1 et k_2 , qui n'a aucun fondement physiologique, mais ajuste le modèle aux caractéristiques personnelles du sportif. Une valeur importante de k_2 indique que le sportif a besoin de beaucoup de temps pour récupérer. Inversement, un sportif avec un k_1 élevé est un sportif qui récupère relativement rapidement.

Confirmant qu'un modèle à deux composants antagonistes procure une bonne représentation des variations de performance, Busso et al. [12] notent que l'erreur entre la performance actuelle et la performance prédite peut atteindre 4% en considérant les fonctions positive et négative comme l'accumulation des entraînements, et les influences positive et négative comme l'impact de ces entraînements. Dans cette modélisation, les paramètres d'aptitude et de fatigue sont récursivement calculés à chaque séance. La fonction positive (PF) et la fonction négative (NF) sont estimées par :

$$PF_n = p^* + k_1 \sum_{i=1}^{n-1} w_i e^{-(n-i)/\tau_1} \quad (2)$$

$$NF_n = k_2 \sum_{i=1}^{n-1} w_i e^{-(n-i)/\tau_2} \quad (3)$$

Durant cette même période, Busso et al. [9] testent plusieurs modélisations et notent, dans un premier temps, que chez des sujets non entraînés un modèle à une fonction (effets positifs sur la performance) permet de mettre en relation de manière significative ($p < 0,001$) les variations de performance et les charges d'entraînement successives. La fonction de fatigue n'améliore la précision du modèle que pour deux sujets sur les huit. Ils cherchent ensuite [9,13] à intégrer les effets cumulés de l'entraînement en utilisant un paramètre de pondération de

la charge d'entraînement qui décroît exponentiellement. Le poids des jours d'entraînement est d'un facteur plus grand que la valeur qui le précède, ce qui donne plus d'importance aux entraînements récents, sans jamais supprimer complètement l'effet des valeurs plus anciennes. Dans leur étude, l'influence de l'entraînement (l) au jour i sur la performance au jour n ($l(i/n)$) est estimée par :

$$l_{(i/n)} = k_1 w_i e^{-(n-1)/\tau_1} - k_2 w_i e^{-(n-1)/\tau_2} \quad (4)$$

Les influences positive (Plnf) et négative (Nlnf) sont dissociées afin de déterminer des profils d'aptitude et de fatigue. La baisse de la performance à la fin de l'entraînement est attribuée à la fatigue et son amélioration les jours suivants à l'aptitude. L'influence négative de l'entraînement sur la performance est alors la somme des influences négatives pour l'ensemble de la période au jour n .

$$Nlnf_n = \sum_{i=1}^{n-1} |l(i/n)| \quad (5)$$

L'influence positive au jour n est estimée par :

$$Plnf_n = \hat{p} + Nlnf_n \quad (6)$$

où est la performance estimée au jour n .

En utilisant les coefficients τ_1 , τ_2 , k_1 et k_2 , Fitz-Clarke et al. [14] déterminent la durée de la période précédant une compétition avant laquelle on doit réduire l'entraînement pour maximaliser la performance. Avec les données de Morton et al., ils trouvent une durée de $15,8 \pm 6,5$ jours avant la compétition ce qui correspond à la littérature sur l'affûtage [15].

$$t_g = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \ln \frac{k_2 \tau_1}{k_1 \tau_2} \quad (7)$$

Busso et al. mettent en évidence en étudiant t_n que la durée de la période de récupération pour retrouver un bon niveau de performance est dépendante non seulement de la charge [13], mais aussi de la fréquence des entraînements [3]. L'augmentation de la fréquence conduit à une augmentation significative du temps de récupération. Il varie de $0,9 \pm 2,1$ jours pour l'entraînement à basse fréquence (trois entraînements par semaine) à $3,6$ jours $\pm 2,0$ jours pour l'entraînement à haute fréquence (cinq entraînements par semaines). Cela les conduit à utiliser des paramètres variant avec le temps, c'est-à-dire à recalculer les paramètres à chaque fois qu'un nouvel entraînement est saisi. Cela améliore significativement la précision du modèle. Les paramètres k_1 , k_2 et τ_2 semblent être les plus sensibles aux changements d'intensité des exercices. Ce qui correspond aux constats faits par Fitz-Clarke et al. [14] qui montrent qu'une variation de 10% de τ_1 influence trois fois moins t_n qu'une variation de 10% de k_1 , k_2 et τ_2 .

Au début des années 2000, Perl et al. [16,17] développent le métamodèle « PerPot » (*performance-potential*) pour décrire et analyser le phénomène des adaptations physiologiques, notamment la surcompensation. Il intègre une notion de limite, absente des autres modèles (Fig. 3).

Le modèle est dynamiquement contrôlé par deux variables qui influencent positivement (RP) et négativement (SP) la performance. Ces deux variables dépendent de manière égale de l'entraînement et influencent la performance de façon antagoniste, en fonction des cinétiques des influences

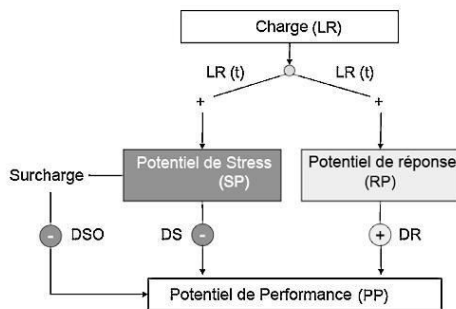


Figure 3 Structure antagoniste avec surcharge du métamodèle performance-potential (PerPot), Perl [17].

négative (DS) et positive (DR). Si le potentiel de contrainte atteint sa limite supérieure, un délai surcharge (DSO) se produit, qui réduit le potentiel de performance, ce qui peut dans des cas extrêmes conduire au surentraînement. Torrents et al. [18] montrent que le modèle PerPot est aussi précis que le modèle «Fitness-Fatigue», avec un écart moyen relatif de 5,06 à 10,62%. L'intérêt majeur du métamodèle PerPot par rapport aux autres modèles est qu'il est borné, que les variables ont une capacité limitée. Cela permet de modéliser les phénomènes de surmenage et de surentraînement.

À la même période, Hohmann et al. [19] démontrent que les effets de l'entraînement sur la performance peuvent être modélisés par la méthode mathématique non linéaire des réseaux de neurones à rétro propagation et qu'elle peut prédire les performances en compétition chez des nageurs (Fig. 4).

Le principe est de considérer que les effets de l'entraînement sont aussi dans une certaine mesure le résultat d'influences endogènes (morphologie, âge, sexe, horloges biologiques). Si le niveau des performances d'un sportif change, sa capacité de réponse à l'entraînement change aussi. Un des avantages majeurs est qu'il n'y a pas besoin de transformer les données originales d'entraînement en unités arbitraires et qu'il permet de modéliser les transformations linéaires et non linéaires liées à l'entraînement. Banister et Calvert [20] déclarent en effet que compte tenu de l'utilisation de fonction de transfert, son modèle n'est stable que pour des périodes ne dépassant pas 60 à 90 jours et qu'il faut ensuite redéfinir les constantes individuelles. L'intérêt le plus important du modèle non linéaire des adaptations à l'entraînement de Hohmann et al. [19] est que malgré l'influence de l'entraînement l'organisme tend à rechercher un certain niveau de stabilité. En ce sens, le réseau de neurones peut

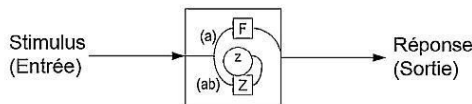


Figure 4 Concepts linéaire (a) et non linéaire (b) de l'adaptation à l'entraînement, Hohmann [19].

ainsi aider à identifier les zones optimales de charges pour atteindre un niveau optimal de performance.

Une étude de Edelman-nusser et al. [21] confirme la très grande précision de la prédiction de performance réalisée avec un réseau de neurones artificiels. L'erreur de prédiction est de 0,05 secondes sur un temps total de 2'12"64 pour une nageuse de 200 mètres brasse de niveau olympique en se basant sur les quatre semaines d'entraînement précédant la compétition.

Silva et al. [22], à l'aide d'un même modèle mathématique, notent une erreur de prédiction inférieure à 0,8% entre les performances estimées et les performances réelles avec cent trente-huit jeunes nageurs (65 hommes et 73 femmes) de 200 mètres quatre nages et 400 mètres dos crawlé. Ils considèrent que le réseau de neurones est un bon outil pour résoudre non seulement les problématiques liées à l'impact de l'entraînement sur la performance, mais aussi la détection des talents dans un large panel de sports.

Les modèles mathématiques actuels de prédiction de la performance ne semblent pouvoir exister que pour un nombre restreint de sports individuels sans interaction directe avec un adversaire, dont la finalité principale est la confrontation avec le temps et/ou l'espace (c'est-à-dire, la course, la natation). En tant que telles, leur capacité et leur précision de prédiction sont fortement dépendantes des caractéristiques des sujets et du type de sport pratiqué. Comme le souligne Bocquet [23], l'explication tient certainement à ce que les premiers « modèles estimant la performance (...) aient été appréhendés à partir de records du monde ou à partir des composantes physiologiques de sportifs ». Et que « ces modèles ont toujours eu comme objectif d'expliquer cette relation vitesse-temps ».

Dans les études sur la modélisation des effets de l'entraînement, l'outil statistique le plus utilisé pour mesurer l'adéquation du modèle à la performance réelle est le coefficient de détermination. Hormis dans le cas des régressions linéaires où il est le carré du coefficient de corrélation, il ne semble pas y avoir consensus quant à sa définition, et il peut être défini comme la part de variance expliquée sur la variance totale. Le coefficient de détermination ajusté intègre le nombre de variables pour atténuer le principal défaut du coefficient de détermination qui fait qu'il augmente avec le nombre de variables. D'autres études utilisent l'écart moyen relatif entre la performance prédite et la performance réalisée, estimé par la moyenne des écarts à la moyenne sur cette même moyenne (exprimé en pourcentage). Le Tableau 1 synthétise les outils statistiques pour des études basées sur le modèle de Banister et Calvert [6].

Selon Hellard et al. [24], les explications probables au problème de précision peuvent être :

- la faible quantité de données, conséquence de la difficulté d'investiguer le sport de haut niveau ;
- l'interdépendance des paramètres du modèle, qui devraient certainement être recalculés au fur et à mesure de l'avancement dans la saison ;
- les biais du modèle, notamment celui énoncé par Fitz-Clarke et al. [14].

La limite majeure est la colinéarité illimitée de la relation entraînement-performance qui laisse supposer que plus le sportif s'entraîne, plus il progresse.

Tableau 1 Description des études basées sur le modèle de Banister et al. [6].

Auteurs	Année	Sport	Sujet	Semaines	Précision	Coefficient
Busso et al. [9]	1990	Haltérophilie	6 hommes	52	0,50–0,97	*
Morton et al. [29]	1990	Course	2 hommes	4	0,71 ; 0,96	*
Busso et al. [12]	1991	Cyclisme	8 hommes	14	0,76–0,93	*
Busso et al. [10]	1994	Lanceur de marteau	1 homme	37	0,91	*
Mujjika et al.	1996	Natation	8 femmes, 10 hommes	50	0,45–0,85	*
Busso et al. [13]	1997	Cyclisme amateur	2 hommes	14	0,66 ; 0,68/0,87 ; 0,87	*
Busso et al. [3]	2002	Cyclisme	6 hommes	15	0,95–0,98	*
Millet et al.	2002	Triathlon	3 femmes, 1 homme	40	0,37–0,74	***
Busso et al.	2003	Cyclisme	6 hommes	15	0,85	**
Wood et al. [26]	2005	Course amateur	1 homme	12	0,92	*
Hellard et al.	2006	Natation	5 femmes, 4 hommes	60	0,79	*
Torrents et al. [18]	2007	Gymnastique	2 femmes	18	5,06–10,62 %	****

* : coefficient de détermination ; ** : coefficient de détermination ajusté ; *** : coefficient de corrélation ; **** : écart moyen relatif.

La modélisation des effets de l'entraînement sur la performance permet de mieux conceptualiser la complexité de l'entraînement, mais elle ne permet pas de prédire avec précision la performance, d'autant plus à haut niveau où les titres, podiums et qualifications se dessinent au centième ou au millième de seconde, et encore moins dans les sports de confrontations directes avec un ou plusieurs adversaires. Pour l'entraîneur, elle semble devoir être plus utilisée comme un outil d'aide à la décision que comme un outil de prédiction.

Dans le domaine de la modélisation, la robustesse, c'est-à-dire la capacité à généraliser les conclusions d'une analyse statistique, est un concept récurrent. Vouloir ajouter beaucoup de paramètres et utiliser une architecture sophistiquée (par ex., réseau de neurones) conduit au surparamétrage, inversement, si le nombre de paramètres est trop faible, le modèle est biaisé et il y a sous-paramétrage. Dans les deux cas de figure, on perd en robustesse. Il s'agit donc de trouver le bon compromis biais-variance.

4. Méthodes de quantification de la charge d'entraînement

Que ce soit pour modéliser l'entraînement et ses effets sur la performance, mais aussi gérer la dynamique des charges pendant le plan d'entraînement, il est indispensable de quantifier l'entraînement. Se basant généralement sur l'algorithme originel de Verchoschanskii [1], plusieurs méthodes existent, et se différencient par les marqueurs utilisés pour exprimer le volume et l'intensité.

4.1. Volume

La distance, la durée et la vitesse sont les trois unités de mesure généralement utilisées par les auteurs. Les expériences menées en natation [5] utilisent principalement les distances, Calvert et al. [7] assimilant même les séances de musculation à un kilomètre de nage à haute intensité. Mais dans la très grande majorité des études, le volume est exprimé en durée (Banister et Calvert [20], Morton et al., [8], Edwards [25], Wood et al., [26], Foster, [27]).

Dans le modèle bioénergétique de Hayes et Quinn [28], il est fait une référence systématique à la vitesse. Les pré-requis de leur modèle sont de baser le calcul des TRIMP (TRaining IMPulse) sur un profil énergétique personnel inspiré de la décroissance progressive de la puissance avec le temps pour des efforts à intensité maximale.

$$\text{TRIMP} = I(D_{\text{act}}) \times C(D_{\text{act}}) \times D \quad (8)$$

où W est le score de TRIMP, I l'intensité relative de l'entraînement, C la concentration de l'entraînement, c'est-à-dire l'expression de la prise en compte de la nature et de la durée des récupérations entre les répétitions, et D la distance.

$$\begin{aligned} \text{TRIMP} = & \left(\frac{V_{\text{act}}}{V_{\text{opt}}} + \frac{V_{\text{act}} - V_{\text{crit}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{crit}}} \right) \\ & \times \left(1 + \frac{I(nD_{\text{act}}) - I(D_{\text{act}})}{I(D_{\text{act}})} e^{\sigma_1 \frac{\tau_{\text{rec}}}{\tau_{\text{effort}}}} \right) \\ & \times nD_{\text{act}} (q_D + (q_{nD} - q_D) e^{-\frac{\tau_{\text{rec}}}{\tau_{\text{effort}}}}) \end{aligned} \quad (9)$$

où V_{act} est la vitesse sur la distance, V_{max} la vitesse maximale instantanée, V_{crit} la vitesse critique, V_{opt} la vitesse optimale, τ_{effort} le temps d'effort, τ_{rec} le temps de récupération, q le facteur de qualité ($V_{\text{act}}/V_{\text{opt}}$) et σ_1 un indicateur du type de récupération.

Bien que restreinte aux activités exprimées en termes de vitesse, cette méthode est un outil intéressant de comparaison des différentes méthodes d'entraînement du métabolisme aérobie (par ex., méthodes continues vs méthodes intermittentes).

4.2. Intensité

L'intensité est le paramètre de la charge d'entraînement qui s'exprime le plus différemment dans les études, car il est fortement dépendant de la prédominance des systèmes énergétiques, des contraintes d'investigation et de la variété des types de séances d'entraînement du sport investigué.

Tableau 2 Zones de fréquence cardiaque, Edwards [25].

Coefficient	FC (%)
1	50–60
2	60–70
3	70–80
4	80–90
5	90–100

4.2.1. Fréquence cardiaque

Pour le calcul des TRIMP dans les sports d'endurance, Banister et Calvert [20] proposent d'utiliser la fréquence cardiaque moyenne de la séance comme marqueur de l'intensité. Multipliée par la durée en minutes, elle fournit une charge d'entraînement exprimé en unités arbitraires. Morton et al. [29] enrichissent la formule et proposent une reformulation pour corriger le biais lié aux longs entraînements à un faible niveau de fréquence cardiaque. Ils utilisent un coefficient pondérateur du type $Y = e^{bx}$ qui correspond à l'évolution du taux de lactate sanguin lors d'un exercice à intensité croissante [8]. Ils démontrent que les réponses des hommes et des femmes sont suffisamment différentes pour déterminer des valeurs différentes de b , respectivement de 1,92 pour les hommes [Eq. (10)] et 1,67 pour les femmes [Eq. (11)].

$$\text{TRIMP} = \text{durée} \frac{FC_{\text{moy exe}} - FC_{\text{rep}}}{FC_{\text{max}} - FC_{\text{rep}}} e^{1,92 \frac{FC_{\text{moy exe}} - FC_{\text{rep}}}{FC_{\text{max}} - FC_{\text{rep}}}} \quad (10)$$

$$\text{TRIMP} = \text{durée} \frac{FC_{\text{moy exe}} - FC_{\text{rep}}}{FC_{\text{max}} - FC_{\text{rep}}} e^{1,67 \frac{FC_{\text{moy exe}} - FC_{\text{rep}}}{FC_{\text{max}} - FC_{\text{rep}}}} \quad (11)$$

Pour répondre au manque de discrimination de l'intensité par la fréquence cardiaque moyenne, Edwards [25] détermine des zones de travail en se référant à la FC_{max} estimée par :

$$\text{Hommes} = 210 - (0,5 \text{ âge}) - (5\% \text{ poids}) + 4 \quad (12)$$

$$\text{Femmes} = 210 - (0,5 \text{ âge}) - (1\% \text{ poids}) \quad (13)$$

Le nombre total de points correspond au nombre de minutes passé dans chacune des zones multiplié par son coefficient, ce qui améliore la sensibilité du calcul des TRIMP (Tableau 2).

Wood et al. [26] utilisent le seuil ventilatoire de manière complémentaire à la fréquence cardiaque. Le seuil ventilatoire est mesuré au préalable à différentes vitesses d'un test sur tapis roulant et le calcul de la charge d'entraînement est le produit du temps passé dans chaque zone par le coefficient pondérateur (Tableau 3).

Combinant l'approche quantitative avec une approche qualitative, Wood et al. [26] notent également que la composante de fatigue du modèle de Banister est modérément corrélée avec l'item fatigue du POMS ($r=0,75$, $p>0,05$), que le seuil ventilatoire ($r=0,94$, $p>0,0001$) et l'économie de l'effort ($r=0,61$, $p=0,04$) sont également corrélés avec la composante d'aptitude.

L'utilisation du cardiofréquencemètre est largement répandue dans le monde sportif. Sa fiabilité et sa précision qui ne cesse de s'améliorer avec le temps permettent d'avoir en temps réel une information sur sa variation suivant le type d'effort. À tel point que plusieurs applications

Tableau 3 Facteurs de pondération pour chaque zone d'intensité d'entraînement, Wood et al. [26].

Zone	Fréquence cardiaque	Coefficient
1	Moitié inférieure entre 50 % de FC réserve et limite inférieure de la zone 3	2
2	Moitié supérieure entre 50 % de FC réserve limite inférieure de la zone 3	4
3	FC au seuil ventilatoire ± 5 bpm	6
4	Entre limite supérieure de la zone 3 et FC max-5 bpm	10
5	Effort supérieur à FC max-5 bpm	16

possibles de la mesure de la fréquence cardiaque ont été proposées comme, mesurer la variabilité de la fréquence cardiaque ou estimer la dépense énergétique. Pour les sports à dominante énergétique majoritairement aérobie, les méthodes basées sur la fréquence cardiaque permettent de quantifier la charge d'entraînement. Mais dans les sports collectifs ou les sports de raquettes, son utilisation peut induire une sous-estimation de la charge d'entraînement du fait de l'inertie du système cardiovasculaire pour des efforts intenses inférieurs à trente secondes. De plus, au-delà d'une certaine intensité, la fréquence cardiaque n'augmente plus, quelles que soient les intensités d'effort.

4.2.2. Lactate

Le taux de lactate sanguin évoluant en fonction de l'intensité de l'effort, Mujika et al. [5,30] calcule la charge d'entraînement au moyen de coefficient pondérateur reflétant les variations de niveau de lactate en fonction des intensités d'entraînement mesuré au préalable à différentes vitesses de nage. L'entraînement à sec est intégré en considérant qu'une heure à sec équivaut à deux kilomètres de nage (Tableau 4).

La charge d'entraînement est alors estimée en multipliant la distance parcourue dans chaque zone par le coefficient pondérateur. Mais, dans une revue de la littérature sur le lactate, Cazorla et al. [31] notent que la mesure de la concentration sanguine du lactate à l'issue de l'exercice intense ne reflète ni la production ni l'accumulation de lactate au sein du muscle et qu'il n'y aurait pas de relation entre la baisse du pH et de la force contractile, qu'il serait donc un marqueur approximatif de l'intensité de l'effort. Bloomer et Cole [32] ne notent

Tableau 4 Facteurs de pondération pour chaque zone d'intensité d'entraînement, Mujika et al. [30].

Zone	Lactatémie	Pondération
1	[La] < 2 mM	1
2	2 mM < [La] < 4 mM	2
3	4 mM < [La] < 6 mM	3
4	6 mM < [La] < 10 mM	5
5	[La] > 10 mM	8

Tableau 5 Échelle de perception de l'effort (EPE) de Foster [27].

Score	Description
0	Repos
1	Très, très facile
2	Facile
3	Modéré
4	Légèrement difficile
5	Difficile
6	—
7	Très difficile
8	—
9	—
10	Maximum

également pas de corrélation entre le lactate et des biomarqueurs du stress oxydative chez des sujets entraînés après des exercices sur tapis roulant, bicyclette ergométrique, au squat et à la presse. Le prélever en routine quotidienne peut être aussi comme douloureux pour le sportif.

5. Quantification de la capacité d'adaptation à l'entraînement

5.1. Charge d'entraînement et estimation subjective

Le surmenage et le surentraînement sont complexes et caractérisés par une grande variété de symptômes [33], fréquemment observés dans les cas de volume et d'intensité d'entraînement maintenus trop longtemps à de hauts niveaux. Les relations entre entraînement et performance incitent les sportifs à augmenter régulièrement les charges d'entraînement, car les progrès sont faibles chez les pratiquants de haut niveau. Attitude amplifiée par le manque de bons résultats en compétition qui incite l'entraîneur et les sportifs à augmenter encore plus la charge.

Foster [27,34] propose une approche innovante basée sur l'effort perçu par le sportif au moyen de l'échelle de Borg CR₁₀. Il ne s'agit plus seulement de calculer la charge d'entraînement, mais aussi d'estimer un état de forme potentiel, estimé par quatre calculs successifs. L'objectif est de déterminer une zone optimale de charge d'entraînement afin de prévenir les risques de dépassement, de surentraînement et de blessures [4] (Tableau 5).

$$CE = \text{Durée} \times \text{RPE} \quad (14)$$

$$\text{Monotonie} = \frac{\bar{x}(\text{CE quotidiennes})}{s(\text{CE quotidiennes})} \quad (15)$$

$$\text{Contrainte} = CE \times \text{Monotonie} \quad (16)$$

$$\text{Fitness} = CE \times \text{Contrainte} \quad (17)$$

La monotonie est un indicateur de la variabilité de l'entraînement. Foster [27] note que les augmentations de la charge d'entraînement et de la monotonie pouvant engendrer dépassement et maladies, et conseillent de préserver dans la semaine une certaine variation de la charge d'entraînement afin de faire baisser la monotonie. L'état de

forme (« fitness ») est un indicateur associé à la capacité de performance temporaire du sportif. Lorsque la contrainte hebdomadaire, qui est un indicateur lié aux adaptations négatives à la charge d'entraînement et au dépassement, est plus importante que la charge, la capacité de performance diminue et vice-versa. Les problèmes de santé surviennent très souvent lorsque les indices de monotonie et de contrainte atteignent des valeurs très élevées : 84 % des maladies étaient précédées d'un pic de charge d'entraînement ; 77 % étaient précédées d'un pic de monotonie [34].

L'intérêt majeur de cette méthode est qu'elle permet de quantifier des activités et des intensités très variées afin d'en déduire des indicateurs associés à l'apparition du surentraînement et à l'apparition des problèmes de santé. Elle permet d'objectiver les microcycles d'entraînement ce qui facilite la mise en place de principes de base de la périodisation que sont la surcharge progressive et l'alternance-charge. Elle ne permet cependant pas de différencier les influences respectives du volume et de l'intensité ni de déterminer l'organisation des charges d'entraînement à l'intérieur d'une même semaine. De manière anecdotique, il est intéressant de noter qu'un sportif qui réalise strictement la même charge d'entraînement tous les jours de la semaine ne pourra déterminer son état de forme faute de pouvoir calculer la monotonie (écart-type de 0 comme diviseur).

De nombreuses études ont étudié les relations entre l'EPE (échelle de perception de l'effort) et d'autres paramètres. Psycharakis [35] note qu'avec des nageurs, l'EPE s'est avérée être une méthode valable pour le contrôle de l'intensité de l'exercice, avec des coefficients de corrélation avec de 0,85 avec le pourcentage de fréquence cardiaque maximale. Kang et al. [36] ont également montré que la durée de l'exercice n'affectait que peu sa précision et Crewe et al. [37] notent que le taux d'augmentation de EPE prédit la durée de l'exercice jusqu'à l'épuisement pour une puissance constante dans des conditions environnementales différentes.

Le polymorphisme de l'échelle de perception de l'effort en fait un outil pratique et non invasif pour toutes les conditions d'entraînement. Les corrélations obtenues vont de modérées à fortes, en fonction du niveau des pratiquants et du type de sport investigué tels que le football (Impelizeri et al., [38]), le rugby (Coutts et al., [39]), le basket (Foster et al., [34]), ou la musculation (Day et al., [40]).

5.2. Les marqueurs du surentraînement et de la récupération

Hooper [4,41], médecin en charge du suivi médical de l'équipe australienne de natation s'orienté dans une nouvelle direction. Elle a demandé à 14 nageurs de haut niveau d'auto évaluer pendant six mois leurs niveaux de fatigue, de stress, de qualité du sommeil et de douleurs musculaires. Chaque état est coté quotidiennement sur une échelle de 1 à 7, de très, très facile à très, très difficile. Durant les sessions de tests, un nageur était déclaré « en manque de fraîcheur » quand tous les critères suivants étaient avérés : pas d'amélioration de sa performance entre l'avant et l'après-saison, pas d'amélioration de ses performances aux

sélections, une fatigue perçue supérieure à cinq plus de sept jours de suite, un commentaire négatif sur la capacité de réponse à l'entraînement dans le carnet d'entraînement, une réponse négative à une question portant sur la présence de maladies. Les nageurs en manque de fraîcheur rapportaient des niveaux de fatigue perçue élevés et de dommage musculaire perçu plus importants que les nageurs en bonne forme. Un mauvais sommeil et un plus haut niveau de stress étaient aussi significativement marqués. Par contre, il n'existait pas de différences biologiques significatives (fréquence cardiaque, pression artérielle, lactate) entre les nageurs en manque de fraîcheur et les nageurs en forme. Sur la base de la facilité de passation et du coût, Hooper et al. considèrent que les échelles de sommeil, fatigue, stress et de dommages musculaires sont de bons outils de prédiction du manque de fraîcheur et des variations de performances en compétition. Ils notent également qu'une augmentation de la sensation de bien-être subjectif pendant la période d'affûtage a permis d'expliquer l'amélioration de la performance en compétition dans 72 % des cas.

Cette recherche suggère qu'un carnet d'entraînement et un suivi quotidien de plusieurs marqueurs subjectifs peuvent être un facteur d'amélioration de l'individualisation de l'entraînement et peut aider à définir les stratégies de distribution de la charge pendant les périodes d'affûtage et d'entraînement intense.

6. Perspectives

Pour l'entraîneur, interroger les interactions entre l'entraînement (c'est-à-dire aptitude) et la récupération (c'est-à-dire fatigue), c'est tenter de maintenir constant un niveau élevé de performance durant toute la période de compétition et de minimiser le risque de surmenage et de blessure. Pour le scientifique, c'est interroger les adaptations liées à une pratique sportive intensive, en respectant les conditions écologiques de cette relation complexe et multifactorielle. Les conditions de pratique, les caractéristiques du sportif, les adversaires sont autant de paramètres qui influencent la performance. Le sportif peut déclarer être en grande forme, mais ne pas être « performant ». Constat fréquent dans les sports collectifs professionnels. La différence se fait donc souvent sur la valeur intrinsèque du joueur.

Les travaux disponibles dans la littérature demandent à être complétés et étudiés en situation d'entraînement régulier intensif (c'est-à-dire, sport de haut niveau et sport professionnel) pour intégrer deux contraintes incontournables : ne pas perturber le déroulement des séances et ne pas créer les conditions du surmenage ou de la blessure.

Une première hypothèse serait de s'intéresser à la mesure de marqueurs qui reflètent la capacité globale d'adaptation d'un individu à l'entraînement [42] en s'inspirant de la théorie du syndrome général d'adaptation de Selye [43] et de considérer que les mécanismes qui induisent l'augmentation des capacités fonctionnelles des tissus spécifiquement sollicités sont essentiellement provoqués par la répétition d'entraînements. Cela consisterait à augmenter les régulations homéostatiques qui mobilisent les ressources énergétiques et structurelles de

l'organisme et qui sont une condition importante pour garantir les effets de l'entraînement [44].

Une seconde hypothèse, s'appuyant sur les notions d'homéostasie et de chronobiologie, consiste à proposer une modélisation mathématique alternative pour simuler la régulation générale induite par les stimuli d'entraînement. Un postulat serait de caractériser les variations du niveau d'aptitude générale du sportif dans le contexte de l'entraînement professionnel en considérant la réponse à l'entraînement comme un mouvement oscillatoire harmonique amorti dont la fréquence et le taux d'amortissement sont strictement personnels. Le principe est de considérer que les effets de l'entraînement sont un état non définitif des interactions entre les différents facteurs exogènes et endogènes et qu'elles sont variables dans le temps. Ce qui signifie qu'une même séance d'entraînement à différentes périodes ne produit pas les mêmes adaptations chez un même sportif et que le stress généré peut, dans certaines conditions, dépasser le niveau de capacités du sportif et générer un épuisement préjudiciable. Verchoschanskii [1] décrit les effets différés à long terme comme l'un des principes de base de la planification des charges et que cela ne fait que rendre plus important le choix de la stratégie de quantification et de suivi de la charge d'entraînement.

7. Applications concrètes

L'enjeu actuel semble se situer sur la sélection des marqueurs quantitatifs et qualitatifs spécifiques au sportif qui permettent de définir son état actuel d'adaptation à l'entraînement afin de réguler ensuite la charge d'entraînement, et de définir des seuils et des stratégies optimales de distribution aux différentes périodes de l'année.

En raison de leurs caractéristiques personnelles, de leurs expériences, et de leurs réactivités individuelles, les réponses de sportifs différents aux mêmes séances font montrent d'une très grande variabilité. Une grande partie de leurs objectifs sont subjectifs et changeants. Un suivi longitudinal, qui peut être pluriannuel, peut permettre d'enregistrer les variations de différents marqueurs, favorisé en cela par l'évolution continue de l'informatique et des technologies de la communication. La grande majorité des sportifs possède un objet communicant, autorisant la collecte de données de différentes natures, en toutes circonstances, en tous lieux et en toute confidentialité, que ce soit pendant les temps d'entraînement, mais aussi les temps de récupération (c'est-à-dire, jours de repos, vacances). Le traitement de ce flux constant de données devrait permettre une meilleure compréhension des effets de l'entraînement, à l'image du cardiofréquencemètre, de ses mécanismes physiologiques et des méthodes d'entraînement associées, mais aussi des capteurs de puissance montés à la place de l'ensemble manivelle-plateau en cyclisme.

Toute la problématique se trouve dans la conception, la construction et la validation des outils de collecte des données et des matrices d'analyses. Pour ce concerne les marqueurs qualitatifs, la principale contrainte relève de l'ergonomie de l'outil et du temps de saisie qui ne doit pas dissuader le sportif de saisir en routine quotidienne. Pour les marqueurs quantitatifs, des projets de recherches

développent déjà des appareils connectés (Nike Fuelband¹, Jawbone Up², Fitbit Flex³) et des textiles (Smart Sensing⁴) capables d'enregistrer l'électrocardiogramme, le rythme respiratoire, la pression artérielle et son taux d'oxygène, mais aussi la température du corps, la posture et l'activité de celui qui porte le vêtement. Ces informations peuvent être ensuite envoyées en temps réel à tout mobile ou tout ordinateur.

Ces outils doivent permettre in fine de présenter les résultats dans des formats qui facilitent les prises de décision pour l'entraîneur et permettre d'améliorer la périodisation de l'entraînement par une meilleure compréhension de la capacité d'adaptation et de réponse à l'entraînement.

8. Conclusion

La modélisation des effets de l'entraînement sur la performance permet de mieux conceptualiser les adaptations du sportif à l'entraînement, mais elle ne permet pas de prédire avec précision la performance. Il existe aujourd'hui peu de moyens suffisamment précis qui permettent de quantifier et de suivre individuellement la charge d'entraînement avec pour objectif de définir le volume, l'intensité, et la périodicité pour provoquer des adaptations spécifiques, et cela en routine quotidienne. Toute charge d'entraînement provoquant des effets spécifiques et cumulés dépendants du niveau d'expertise, mais aussi des charges précédentes, il serait intéressant de définir des profils d'adaptation individuels afin de mieux comprendre les réponses aux différents stimuli d'entraînement et de mieux prédire la capacité de performance. L'évolution des technologies laisse entrevoir la possibilité de mettre en place des mesures répétées de multiples marqueurs, qualitatifs et quantitatifs. Ainsi, une attention particulière pourrait être portée sur la conception de système d'aide à la décision qui s'appuie notamment sur l'électronique, l'informatique et les télécommunications afin de permettre aux entraîneurs de clarifier la vision du contexte dans lequel les décisions sont prises, et de permettre aux chercheurs d'analyser les séries temporelles des différents marqueurs afin de déterminer si les variations sont néfastes, sans effets ou bénéfiques à la capacité de performance.

Déclaration d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts en relation avec cet article.

Références

- [1] Verchoschanskii JV. L'entraînement efficace. Paris: Presses Universitaires de France; 1992.
- [2] Mujika I. The influence of training characteristics and tapering on the adaptation in highly trained individuals: a review. *Int J Sports Med* 1998;19(7):439–46.
- [3] Busso T, Benoit H, Bonnefoy R, Feasson L, Lacour JR. Effects of training frequency on the dynamics of performance response to a single training bout. *J Appl Physiol* 2002;92(2):572–80.
- [4] Hooper SL, MacKinnon TL, Howard A, Gordon RD, Bachmann AW. Markers for monitoring overtraining and recovery. *Med Sci Sports Exerc* 1995;27(1):106–12.
- [5] Mujika I. Modeled responses to training and taper in competitive swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 1996;28(2):251–8.
- [6] Banister EW, Calvert TW, Savage MV, Bach T. A systems model of training for athletic performance. *Aust J Sports Med* 1975;7:57–61.
- [7] Calvert WT, Banister EW, Savage MV, Bach T. A system model of the effects of training on physical performance. *IEEE Trans Syst Man Cybern* 1976;6(2):94–102.
- [8] Morton RH. Modeling training and overtraining. *J Sports Sci* 1997;15(3):335–40.
- [9] Busso T, Häkkinen K, Pakarinen A, Carasso C, Lacour JR, Komiet PV, et al. A systems model of training responses and its relationship to hormonal responses in elite weight-lifters. *Eur J Appl Occupational Physiol* 1990;61(1–2):48–54.
- [10] Busso T, Candau R, Lacour J-R. Fatigue and fitness modelled from the effects of training on performance. *Eur J Appl Occupational Physiol* 1994;69(1):50–4.
- [11] Morton RH. A 3-parameter critical power model. *Ergonomics* 1996;39(4):611–9.
- [12] Busso T, Carasso C, Lacour JR. Adequacy of a systems structure in the modeling of training effects on performance. *J Appl Physiol* 1991;71(5):2044–9.
- [13] Busso T, Denis C, Bonnefoy R, Geysant A, Lacour JR. Modeling of adaptations to physical training by using a recursive least squares algorithm. *J Appl Physiol* 1997;82(5):1685–93.
- [14] Fitz-Clarke JR, Morton RH, Banister EW. Optimizing athletic by influence curves. *J Appl Physiol* 1991;71(3):1151–8.
- [15] Bosquet L, Montpetit J, Arvisais D, Mujika I. Effects of tapering on performance: meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39(8):1358–65.
- [16] Perl J. Antagonistic adaptation systems: an example of how to improve understanding and simulating complex system behaviour by use of meta-models and on line-simulation. In: 16th IMACS Congress. 2000.
- [17] Perl J. PerPot: a metamodel for simulation of load performance interaction. *Eur J Sport Sci* 2001;1(2):1–13.
- [18] Torrents C, Balagué N, Perl J, Schöllhorn W. Linear and non-linear analysis of the traditional and differential strength training. *Ugdyamas Kuno Kultura Sportas (Education Physical Training Sport)* 2007;66(3):39–47.
- [19] Hohmann A, Edelmann-Nusser J, Henneberg B. A non-linear approach to the analysis and modeling of training and adaptation in swimming. In: 18 International Symposium on Biomechanics in Sports. 2000.
- [20] Banister EW, Calvert TW. Planning for future performance implications for long-term training. *Can J Appl Sport Sci* 1980;5(3):170–6.
- [21] Edelmann-Nusser J, Hohmann A, Henneberg B. Modeling and prediction of competitive performance in swimming upon neural networks. *Eur J Sport Sci* 2002;2:1–12.
- [22] Silva JS, Costa AM, Oliveira PM, Reis VM, Saaveda J, Rouboa A, et al. The use of neural network technology to model swimming performance. *J Sports Sci Med* 2007;6:117–25.
- [23] Bocquet V. Modélisation de l'endurance humaine, de l'expèce à l'individu. Paris: 11: Thèse de l'Université Descartes, R; 2002.
- [24] Hellard P, Avalos M, Lacoste L, Barale F, Chatard JC, Millet GP. Assessing the limitations of the Banister model in monitoring training. *J Sports Sci* 2000;24(5):509–20.
- [25] Edwards S. The heart rate monitor book. Sacramento, CA: Fleet Feet Press; 1993.

¹ http://www.nike.com/us/en_us/c/nikeplus-fuelband.

² <https://jawbone.com/up>.

³ <http://www.fitbit.com/fr/flex>.

⁴ <http://www.smartsensing.fr/>.

- [26] Wood RE, Hayter S, Rowbottom D, Stewart I. Applying a mathematical model to training adaptation in a distance runner. *Eur J Appl Physiol* 2005;94(3):310–6.
- [27] Foster C. Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30(7):1164–8.
- [28] Hayes P, Quinn M. A mathematical model for quantifying training. *Eur J Appl Physiol* 2009;106:839–47.
- [29] Morton RH, Fitz-Clarke JR, Banister EW. Modeling human performance in running. *J Appl Physiol* 1990;69(3):1171–7.
- [30] Mujika I, Chatard JC, Busso T, Geysant A, Barale F, Lacoste L. Effects of training on performance in competitive swimming. *Can J Appl Physiol* 1995;20(4):395–406.
- [31] Cazorla G, Petibois C, Bosquet L, Léger L. Lactate et exercice: mythes et réalités. *Rev STAPS* 2001;54:63–76.
- [32] Bloomer BJ. Relationship between blood lactate and oxidative stress biomarkers following acute exercise. *Open Sports Med J* 2009;3:44–8.
- [33] Meeusen R, Duclos M, Foster C, Fry A, Gleeson M, Nieman D, et al. Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Med Sci Sports Exerc* 2013;45(1):186–205.
- [34] Foster C, Florhaug JAA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LAA, Parker S, et al. A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res* 2001;15(1):109–15.
- [35] Psycharakis SG. A longitudinal analysis on the validity and reliability of ratings of perceived exertion for elite swimmers. *J Strength Cond Res* 2011;25(2):420–6.
- [36] Kang J, Chaloupka EC, Biren GB, Mastrangelo MA, Hoffman JR. Regulating intensity using perceived exertion: effect of exercise duration. *Eur J Appl Physiol* 2009;105(3):445–51.
- [37] Crewe H, Tucker R, Noakes T. The rate of increase in rating of perceived exertion predicts the duration of exercise to fatigue at a fixed power output in different environmental conditions. *Eur J Appl Physiol* 2008;103:569–77.
- [38] Impellizzeri FM, Rampinini E, Coutts AJ, Marcora SM. Use of RPE-based training load in soccer. *Med Sci Sports Exerc* 2004;36(6):1042–7.
- [39] Coutts AJ, Murphy A, Pine M, Reabum O, Impellizzeri F. Validity of the session-RPE method for determining training load in team sport athletes. *J Sci Med Sport* 2003;6:525.
- [40] Day ML, McGuigan MR, Brice G, Foster C. Monitoring exercise intensity during resistance training using the session-RPE scale. *J Strength Cond Res* 2003;18(2):353–8.
- [41] Hooper S, Mackinnon LT, Hanrahan S. Mood states as an indication of staleness and recovery. *Int J Sport Psychol* 1997;28:1–12.
- [42] Borresen J, Lambert MI. The quantification of training load, effect on performance. *Sports Med* 2009;39:779–95.
- [43] Selye H. *Du rêve à la découverte*. Montréal: Éditions de La Presse; 1973.
- [44] Viru M, Hackney AC, Karelson K, Janson T, Kuus M, Viru A. Competition effects on physiological responses to exercise: performance, cardiorespiratory and hormonal factors. *Acta Physiol Hung* 2010;97(1):22–30.



Commentary

A SCITECHNOL JOURNAL

Competition Calendar and Strength - Aerobic Training Sessions Interaction: The Brainteaser of Coach to Manage Training Schedule in Elite Team Sport Athletes

Stéphane Morin¹, Said Ahmaidi¹ and Pierre-Marie Leprêtre^{1*}

Abstract

Training load (TL) is accurately prescribed to induce sport-specific adaptations for optimizing performance. TL model related performance at a specific time to the initial performance level and the superimposition of residual training effects. However, in team sport, the calendar of competitions imposed multi peak performances during the season. Additionally, physiological and model responses did not increase linearly with training load. If TL model was used to evaluate the effects of training strategies, in order to provide sufficient training stimuli to help highly qualified team sport athletes to progress and predict the physical performance, we argued that the respective time course of the physiological responses must be considered in elite team sport players when discussing performance changes that occur with training session interaction.

Keywords

Team sport; Training load; Season; Management; Coaching

Introduction

With team sports, leagues often set competition schedules; consequently it can be difficult to create optimal training periodization. Contrary to traditional periodization observed in individual sports, block periodization framework proposed to provide multi peak performances during the season and, in the same time, sufficient training stimuli to help highly qualified team sport athletes to progress [1]. In this case, the training impulse was used to evaluate the effects of training strategies [2] and so predict the physical performance [3]. Original impulse response (IR) model [4] related performance at a specific time to the initial performance level and the superimposition of residual training effects. One of these was, for example, the delayed effect of endurance exercise on skeletal muscle metabolism [5]. Based on this dynamic, Banister et al. [4] fitted performance ability from 5-parameter model with linear function and they assumed a linear relationship between training load, beneficial (i.e. fitness) and detrimental (i.e. fatigue) training effects, which both occurred

with different time constants [4]. However physiological and model responses did not increase linearly with training load. In 2003, Busso [6] demonstrated that relationship between daily amounts of training and performance were best described by an inverted-U-shape. This author assumed that the gain term for the negative component is a state variable varying over time in accordance with system input. Then he proposed to estimate the gain of detrimental training effect at a given day from a mathematical recursion using a first-order filter [6]. Banister et al. [7] also observed a plateau of fatigue model while serum enzyme activity exponentially decreased during prolonged hard training. Hence, Hellard et al. [8] included a saturation function in the original IR model to reveal individual response to training and so emphasize the importance of individualizing training program to promote positive adaptations. These models focused on the time of physiological parameters to remain at resting value, but neither original [4] nor modified [8] IR models took into account the evolution of physiological responses over time. Yet, Takekura and Yoshida [5] reported a biphasic response in the time course of glycolytic enzymes activity during exercise recovery. They showed two peaks with different values at 0 and 24-h post-exercise. Furthermore, IR model worked from the assumption that exercise intensity was constant. In team sports, training program included tactical, technical, specific conditioning and strength training, and competition matches. Studies based on Global positioning system (GPS) and accelerometer data showed the intermittent nature of professional soccer activities during in-season field-based training [29,30]. IR model remained so difficult to apply in team sports.

Another method, based on the product between rating of perceived exertion and time duration of the training session, i.e. session-RPE method, was recommended to monitor training load in different team sports [9-11]. Foster et al. [12] have been already demonstrated the validity and the independence in regard of mode and exercise intensity of session-RPE method to quantify training load. Recently, Rodriguez-Marroyo, et al. [11] reported a significant correlation between the session-RPE of team sport players with that observed by coaches. In addition, more consequent was the match issue, greater was the session-RPE [10]. Moreira, et al. [10] also observed an effect on the match importance on salivary stress hormones. Hence, session-RPE appeared to be a useful and practical method to monitor and control the training load and other derived parameters in an easy way during volleyball [11]. However, non-linear relation was found between training load based on session-RPE and salivary stress markers [13]. Lockie et al. [14] demonstrated that exercise induced a 2-4 hours phase shift value of circadian gene expression without affecting maximum level and circadian amplitude of clock gene expression. Burt and Twist [15] revealed a RPE - physical performance disassociation, which still occurred until 48 hours after hard training session. They observed that prior plyometric training session affected mean power output, covered distance and oxygen uptake though RPE remained unchanged during subsequent cycling time-trial performed 48 hours at least. Okamoto et al. [16] also reported that session-RPE of team sport athletes was not sensitive to weekly load increases in sprint and plyometric training programs. Finally, session RPE scores in young elite soccer players did not contribute to the prediction of performance whereas the duration of training and game play in the

*Corresponding author: Pierre-Marie Leprêtre Université de Picardie Jules Verne UFR-STAPS, Laboratoire de Recherche Adaptations physiologiques à l'exercice et Réadaptation à l'Effort, EA-3300 allée Paschal Grousset, 80025 Amiens cedex, France, E-mail: pierre-marie.lepretre@u-picardie.fr

Received: March 26, 2015 Accepted: October 06, 2015 Published: October 11, 2015

week before was most strongly related to their field test performance [17]. Therefore, IR model and session-RPE method failed, together, to take in consideration non-linear damped physiological responses to exercise. Training load should be accurately prescribed to induce sport-specific adaptations for optimizing performance at a given day.

Recently, Akubat et al. [20] and Manzi et al. [21] applied the concept of individualized TRIMP (iTRIMP) to the training load quantification in soccer players. Based on the assessment of individual lactate and heart-rate profiles determined during an incremental treadmill test [22], Akubat et al. [20] and Manzi et al. [21] showed that the iTRIMP response to training was highly correlated to the change of aerobic fitness of soccer players. But, to our knowledge, no study has examined the sensitivity of iTRIMP to sequencing strength and endurance training [23], muscle or performance to soccer game [24]. FIFA lately permit the use of GPS and heart rate measurements in competitive football [25]. Suarez-Arrones et al. [26] observed that players with less overall running performance during "the" game presented the poorest achievement of external (GPS data) and internal (heart rate response) load ratio. GPS data analysis also showed that injuries were related to the training and gameplay intensity [27]. In fact, Ehrmann et al. [27] found that soccer performed significantly higher distance covered in the weeks preceding an injury compared to their seasonal averages. Then, these authors concluded that coaches should be focused on the specific physical and physiological responses to optimize the training prescription in soccer. However, results from data mining should be done with caution. Although a similar sensitivity to performance decrements during a football match, large differences in the determination of the absolute distances covered have been reported between different match analysis systems (e.g. semi-automatic multiple-camera system, video-based time-motion analysis system and GPS) [30]. Prior data mining based on GPS or video-capture, the occurrence of different daily and weekly training loads has been previously reported in team sport [9]. Empirical coach methods consisted to decrease weekly training load when a weekend-match was planned. Hence, Malone et al. [18] observed a lower training load value on the day before match compared to 2 and 5 days before a match. However, the perception of training remained harder in elite soccer players, especially the youngest, than what intended by coaches [19]. If one block periodization basis was the rational sequencing in order to superimpose residual training effects and so contribute to the biological adaptation [1], we suggested that the respective time course of the physiological responses must be considered in team sport when discussing performance changes that occur with training session interaction. Thus, associated to perceived exertion, specific field tests should be frequently performed during pre-season and competitive periods to adapt the training program to the available capacities of each soccer players [28].

References

1. Issurin V (2008) Block periodization versus traditional training theory: a review. *J Sports Med Phys Fitness* 48: 65-75.
2. Painter KB, Haff GG, Ramsey MW, McBride J, Triplett T, et al. (2012) Strength gains: block versus daily undulating periodization weight training among track and field athletes. *Int J Sports Physiol Perform* 7: 161-169.
3. Faria EW, Parker DL, Faria IE (2005) The science of cycling: physiology and training - part 1. *Sports Med* 35: 285-312.
4. Banister EW, Calvert TW, Savage MV, Bach TM (1975) A systems model of training for athletic performance. *Austr J Sports Med* 7: 57-61.
5. Takekura H, Yoshioka T (1988) Acute exhaustive exercise changes the metabolic profiles in slow and fast muscles of rat. *Jpn J Physiol* 38: 689-697.
6. Busso T (2003) Variable dose-response relationship between exercise training and performance. *Med Sci Sports Exerc* 35 1188-1195.
7. Banister EW, Morton RH, Fitz-Clarke J (1992) Dose/response effects of exercise modeled from training: physical and biochemical measures. *Ann Physiol Anthropol* 11: 345-356.
8. Hellard P, Avalos M, Millet G, Lacoste L, Barale F, et al. (2005) Modeling the residual effects and threshold saturation of training: a case study of Olympic swimmers. *J Strength Cond Res* 19: 67-75.
9. Impellizzeri FM, Rampinini E, Coutts AJ, Sassi A, Marcora SM (2004) Use RPE-based training load in soccer. *Med Sci Sports Exerc* 36: 1042-1047.
10. Moreira A, Freitas CG, Nakamura FY, Drago G, Drago M, et al. (2013) Effect of match importance on salivary cortisol and immunoglobulin A responses in elite young volleyball players. *J Strength Cond Res* 27: 202-207.
11. Rodríguez-Marroyo JA, Medina J, García-López J, García-Tormo JV, Foster C (2013) Correspondence between training load executed by volleyball players and the one observed by coaches. *J Strength Cond Res* 28: 1588-1594.
12. Foster C, Florhaug JA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LA, et al. (2001) A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res* 15: 109-115.
13. Milanez VF, Ramos SP, Okuno NM, Boulosa DA, Nakamura FY (2014) Evidence of a non-linear dose-response relationship between training load and stress markers in elite female futsal players. *J Sports Sci Med* 13: 22-29.
14. Lockie RG, Murphy AJ, Scott BR, Janse de Jonge XA (2012) Quantifying session ratings of perceived exertion for field-based speed training methods in team sport athletes. *J Strength Cond Res* 26: 2721-2728.
15. Burt DG, Twist C (2011) The effects of exercise-induced muscle damage on cycling time-trial performance. *J Strength Cond Res* 25: 2185-2192.
16. Okamoto A, Yamamoto T, Matsumura R, Node K, Akashi M (2013) An out-of-lab trial: a case example for the effect of intensive exercise on rhythms of human clock gene expression. *J Circadian Rhythms* 11: 10.
17. Brink MS, Nederhof E, Visscher C, Schmikil SL, Lemmink KA (2010) Monitoring load, recovery, and performance in young elite soccer players. *J Strength Cond Res* 24: 597-603.
18. Malone JJ, Di Michele R, Morgans R, Burgess D, Morton JP, et al. (2015) Seasonal training-load quantification in elite English premier league soccer players. *Int J Sports Physiol Perform* 10: 489-497.
19. Brink MS, Frencken WGP, Jordet G, Lemmink KA (2014) Coaches' and players' perceptions of training dose: not a perfect match. *Int J Sports Physiol Perform* 9: 497-502.
20. Akubat I, Patel E, Barrett S, Abt G (2012) Methods of monitoring the training and match load and their relationship to changes in fitness in professional youth soccer players. *J Sports Sci* 30: 1473-1480.
21. Manzi V, Bovenzi A, Impellizzeri FM, Carminati I, Castagna C (2013) Individual training-load and aerobic-fitness variables in premiership soccer players during the precompetitive season. *J Strength Cond Res* 27: 631-636.
22. Manzi V, Iellamo F, Impellizzeri F, D'Ottavio S, Castagna C (2009) Relation between individualized training impulses and performance in distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 41: 2090-2096.
23. Makhlof I, Castagna C, Manzi V, Laurencelle L, Behm DG, et al. (2015) The Effect of Sequencing Strength and Endurance training in Young Male Soccer Players. *J Strength Cond Res* 27.
24. Mohr M, Draganidis D, Chatziniolaou A, Barbero-Álvarez JC, Castagna C, et al. (2015) Muscle damage, inflammatory, immune and performance responses to three football games in 1 week in competitive male players. *Eur J Appl Physiol* 116.
25. FIFA (2015) Fédération Internationale de Football Amateur, Approval of electronic performance and tracking system (EPTS) devices, circular n° 1494, Zurich.
26. Suarez-Arrones L, Torreño N, Requena B, Sáez de Villarreal E, Casamichana D, et al. (2014) Match-play activity profile in professional soccer players during official games and the relationship between external and internal load. *J Sports Med Phys Fitness* 7.
27. Ehrmann FE, Duncan CS, Sindhusake D, Franzsen WN, Greene DA (2015)

Citation: Morin S, Ahmaidi S, Lepêtre PM (2015) Competition Calendar and Strength - Aerobic Training Sessions Interaction: The Brainteaser of Coach to Manage Training Schedule in Elite Team Sport Athletes. *J Athl Enhancement* 4:4.

doi:<http://dx.doi.org/10.4172/2324-9080.1000208>

- GPS and Injury Prevention in Professional Soccer. *J Strength Cond Res* 11.
28. Saw AE, Main LC, Galtin PB (2015) Monitoring the athlete training response: subjective self-reported measures trump commonly used objective measures: a systematic review. *Br J Sports Med*.
29. Scott BR, Lockie RG, Knight TJ, Clark AC, Janse de Jonge XA (2013) A comparison of methods to quantify the in-season training load of professional soccer players. *Int J Sports Physiol Perform* 8: 195-202.
30. Randers MB, Mujika I, Hewitt A, Santisteban J, Bischoff R, et al. (2010) Application of four different football match analysis systems: a comparative study. *J Sports Sci* 28: 171-182.

Author Affiliation

[Top](#)

Laboratoire de Recherche Adaptations physiologiques à l'exercice et Réadaptation à l'Effort, EA-3300, UFR-STAPS, Université de Picardie Jules Verne, 80025 Amiens, France

Submit your next manuscript and get advantages of SciTechnol submissions

- ❖ 50 Journals
- ❖ 21 Day rapid review process
- ❖ 1000 Editorial team
- ❖ 2 Million readers
- ❖ Publication immediately after acceptance
- ❖ Quality and quick editorial, review processing

Submit your next manuscript at • www.scitechnol.com/submission

1 *Révision en cours dans International Journal of Sport Performance and Physiology*

2 *Title of the article:*

3 **Relevance of Damped Harmonic Oscillation for Modeling the Training Effects**
4 **on Daily Physical Performance Capacity in Team Sport.**

5
6
7 *Submission Type:*

8 Original investigation

9
10 *Authors:*

11 Stéphane Morin¹, Saïd Ahmaïdi¹, Pierre-Marie Leprêtre¹.

12 Affiliations: ¹Laboratoire de Recherche "Adaptations physiologiques à l'exercice et
13 Réadaptation à l'Effort", EA-3300 UFR-STAPS, Université de Picardie Jules Verne

14
15 *Corresponding author:*

16 Stéphane Morin.

17 Laboratoire de Recherche "Adaptations physiologiques à l'exercice et Réadaptation
18 à l'Effort", EA-3300

19 UFR-STAPS

20 Université de Picardie Jules Verne

21 Tel: +33 607018667

22 E-mail: stephane.morin@univ-nantes.fr

23
24 *Preferred Running Head:* Modeling training effects

25 *Abstract Word Count:* 250

26 *Text Only Word Count:* 3505

27 *Number of Figures and Tables:* 9

Abstract

Purpose: Positive and negative effects of training induce apparent oscillations of performance, suggesting that the delayed cumulative effects of training on daily performance capacity (DPC) are best fitted by sine waves damped over time. The aim of this study was to examine and compare the criterion validity of Banister's TRIMP model and damped harmonic oscillation model (DHO) for quantifying training load (TL)-DPC relationship. **Methods:** Six female professional volleyball players (20.8 ± 2.4 y) were monitored using session rating of perceived exertion (sRPE) during 9 months to quantify TL. Countermovement jump (CMJ) and four-step approach countermovement jump (4sCMJ) performances were recorded once a month. **Results:** DPC was best fitted by the DHO model than Banister's TRIMP model (CMJ : $R^2 = 0.80 \pm 0.08$ and 0.69 ± 0.20 , respectively; 4sCMJ : $R^2 = 0.86 \pm 0.09$ and 0.67 ± 0.29 , respectively). The damping parameter θ and the period T were positively correlated with age ($\rho = 0.81$, $p < 0.05$ and $\rho = 0.86$, $p < 0.02$ respectively). **Conclusion:** DHO model is a useful tool for modeling DPC as the sum of the delayed DPCs from the consecutive training and recovery days. DPC could be considered as the expression of the individual process of accumulation and dissipation of fatigue induced by training workouts. DHO model parameters were correlated with age. It prompts us to postulate that expertise has a major influence on DPC. Thus DHO model will help coaches develop a greater understanding of training effects and makes planning and monitoring of training process more effective.

Key words: training load, training effects, monitoring, model, fitness

52

Introduction

53 The analysis of training processes is the major concerns of coaches to monitor
54 training and synchronize performance peaks with the competitions¹, and scientists to
55 model the training effects on performance. In order to quantifying training and its
56 relationship to performance, original impulse-response (IR) model of Banister^{2,3} reports
57 performance at a specific day to the difference between positive (i.e. fitness) and negative
58 (i.e. fatigue) training effects. IR model of Banister use transfer functions to represent the
59 relationship between inputs and outputs. Dependent on adjustment factors and time
60 constants, IR model could lead to positive or negative variations in daily performance
61 capacity (DPC).

62 IR model was designed to simulate the kinetics of biological markers (heart rate,
63 and lactate reduction during the recovery). Banister and al.^{2,3} fitted performance ability
64 from 5 parameters model with linear function and they assumed a linear relationship
65 between training load, beneficial (i.e. fitness) and detrimental (i.e. fatigue) training effects,
66 which both occurred with different time constants^{2,3}. Therefore, DPC variations were
67 inversely related to the training load (TL): the greater TL, the lower the DPC⁴.

68 However, quantification of TL and DPC by a linear regression approaches provides
69 some limitations. First, it is commonly known that increasing TL does not cause an
70 improvement in DPC in the same proportions. Secondly, physical performance is often
71 measured among individual sports, which have one or two short periods of competitions
72 per year, and thus generally use linear periodization^{1,5}. A focused literature review also
73 reveals that the IR model was performed with cohorts of either untrained or moderately
74 trained subjects^{2,3,6} whose progress are often linear⁷.

75 Moreover, competitions in team sport are spread over a year and match schedules
76 congested impose on coaches to use non-linear periodization patterns in order to provide
77 one or two peak performances per week during the entire season. So, TL must therefore
78 vary over time⁸ (e.g. microcycle, macrocycle). With TL remaining at the same level,
79 players would accommodate to this stress therefore leading to no further improvements in
80 performance will occur.

81 Additionally, many biological functions (sleep regulation, hormonal action and
82 core temperature⁹) vary regularly. Circadian oscillations occur in several physiological and

83 behavioral functions that contribute to athletic performance¹⁰. Indirect evidence for the
84 existence of circadian rhythms in sports performance comes from the examination of the
85 time of day at which athletes perform best (or worst) in actual sports events¹¹. Biological
86 adaptation is therefore a complex non-linear problem because this adaptation leads to
87 changes in the system itself¹².

88 These oscillations allow thereby to postulate that changes in DPC could have a
89 non-linear, non-monotonic and individual rhythm although precise information on the
90 relative importance of endogenous and exogenous factors is lacking. Thus, we postulated
91 that DPC changes could be fitted with a sine wave model and account for delayed
92 cumulative effects of previous sessions.

93 **Methods**

94 **Subjects:** Six female professional volleyball players belonging to a high-level
95 French volleyball team participated in the study. They were 20.8 ± 2.4 years old, $180.0 \pm$
96 7.0 cm, 69.2 ± 9.8 kg, with a 18.6 ± 2.7 % fat percentage. None of the participant had a
97 history of neuromuscular disease. The University Ethical Committee approved the study
98 and the athlete signed a written informed consent.

99 **Design :** Training data were recorded for nine month on a smartphone or a tablet
100 computer by means of a dedicated responsive web design website
101 (<http://www.trainingloadpro.com>). All players used a visual analog scale (VAS) to assess
102 the intensity of training and competition (sRPE). The VAS was a plain line with its left end
103 representing a very low training intensity session (value: 1/10) and its right end an
104 extremely intense training session (value: 10/10). 0/10 was the value assigned to recovery
105 day (day without training session or game). There was no reference text and the numeric
106 value were not visible to the players. Players moved the cursor along the line with the
107 finger. TL was the result of the sRPE by the duration of the session (minutes) expressed in
108 arbitrary units (a.u.). Each player's sRPE was collected ~30 minutes after the end of each
109 session to ensure a global perceived intensity for the entire session¹³. All players were
110 familiar with the procedure before the study.

111 **Testing:** A player in great form does not necessarily achieve very good
112 performance. Hence, exogenous factors such as skill and talent of its opponent¹⁴ influence
113 the ultimate performance. However, vertical jumping ability is likely the single most

114 important performance indicator in volleyball. Considering the tactical nature and
 115 importance of jumping activities and the frequency with which they occur in a typical
 116 match, countermovement jump ability (i.e., countermovement jump, CMJ) and approach
 117 jump ability (i.e., four-step approach countermovement jump, 4sCMJ) are considered
 118 critical performance indicators for volleyball player^{15,16,17}. The players were familiarized
 119 with the CMJ tests a few days before the first testing session. They were told to consume
 120 their last meal at least 3 h before the scheduled test time. They were also asked to avoid
 121 caffeine and alcohol. An Optojump photocell system (Microgate) was used to measure the
 122 vertical displacement of the center of gravity. All jumps were performed with arm swing
 123 separated by 30 sec at rest, once a month in randomized order to increase the confidence
 124 that the model is robust and reliable. The best performance of the four trials was retained
 125 for each test.

126 **Methodology**

127 The most common statistical technique used in chronobiological studies of human
 128 performance is Cosinor analysis¹⁸. It is based on the sine function (characterized mainly by
 129 an amplitude and a period) and can therefore be validated with analytical models of
 130 periodic regression using one or more harmonic components. The current study
 131 investigates the relevance of a model based on damped harmonic oscillations (DHO) to
 132 model DPC. After reaching a minimum and a maximum, the oscillation gradually returns
 133 to its initial level over the following days. Therefore, it seems necessary to study long-term
 134 changes in DPC in the context of non-linear and non-monotonic processes.

135 Day-to-day variation in DPC can be represented schematically as the product of a
 136 damped simple harmonic oscillation (the solution to the differential equation for the simple
 137 harmonic oscillator) and an exponential resistance term (Figure 1). The DPC on day n can
 138 be expressed as follows:

$$\text{Single DPC}_n = -TL_n \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \pi\right) e^{\frac{-t}{\theta}}$$

139 (Equation 1)

140 Where DPC represents the performance capacity on day n, TL_d is the daily TL
 141 (which is the sum of all TL of the day), t is the elapsed time (in days) since the training day

142 (t=0 for the training day), θ is the damping parameter in arbitrary unit (a.u.) and T is the
 143 period of time required for one complete oscillation (in days). The model θ damping
 144 parameter and period T are determined by fitting the modeled DPC values to the CMJ
 145 values measured throughout the training program. Lastly, the cumulative DPC on day n of
 146 all previous DPC is described as (Equation 2) and illustrated in figure 2:

$$\text{Cumulative DPC}_n = \sum_{i=1}^n \text{DPC}_{(n-i)_i}$$

147 (Equation 2)

148 After several days of training, the cumulative DPC on a given day (n) can be
 149 positive or negative, depending on the oscillation of the consecutive training days (Figure
 150 2).

151 Statistical analysis: All data are presented as mean values and standard deviations.
 152 Statistical analysis was performed using the SPSS statistical package (ver. 20.0 SPSS Inc.
 153 USA). Given the non-linear and non-monotonic variations in DPC, correlations were first
 154 assessed using Kendall's coefficient (τ) that has the interest of transcend the metric
 155 measured variables too.

156 Parameters (T and θ) of DHO model (Table 2) and parameters (τ_a , τ_f , κ_a and κ_f) of
 157 Banister's model (Table 3) were determined by minimizing residual sum squares (RSS)
 158 between predicted and real performances with a nonlinear regression
 159 ($Y=pr_1+pr_2.X_1+pr_3.X_1^2+\dots$). The least squares method for calculating the regression line
 160 is based on the assumption that the points are independent. However, the repeated
 161 measures on the same player are not independent. pr_1 , pr_2 , $pr_3\dots$ are the parameters of the
 162 polynomial function of the random effects model associated with each player. They vary
 163 randomly according to a normal statistical law considering that each player has a specific
 164 evolution represented through a common model but with parameters that are uniquely
 165 individual. Coefficient of determination (R^2) was used to compare models and Shapiro-
 166 Wilk W-test for small samples to evaluate the Gaussian distribution of residuals¹⁹. Mean
 167 square error (MSE) was used to measure of the differences the between predicted values
 168 by the models and the observed values. Spearman's correlation coefficient (ρ) was used to
 169 assess associations between the model's parameters and the athletes' age. Significant

170 difference was set at p value equal to 0.05.

171 **Results**

172 Data were collected in 250 training sessions. Our results showed that all the players
173 trained 8 ± 0.5 times a week with 2 ± 0.2 days of recovery. In pre-season, training load
174 was 4617 ± 444 a.u, the volume was 15.1 ± 1.4 hours and sRPE was 4.9 ± 0.5 a.u. In
175 competition period, training load was 4229 ± 640 a.u, the volume was 13.8 ± 0.6 hours and
176 sRPE was 5.0 ± 1.0 a.u. In competition period, the profile of weekly training load
177 remained the same for all the weeks (Figure 3).

178 The jumping performances of all the players presented a large fluctuation over time
179 (Table 1). The CMJ performance varied sinusoidally for all the volleyball players and best
180 performance ranged from 45.8 cm (player P6) to 51.8 cm (player P5). The 4sCMJ
181 performance varied sinusoidally for all the volleyball players and best performance ranged
182 from 51.2 cm (player P6) to 55.7 cm (player P5). The four-step approach improved the
183 CMJ performance for $9.8\% \pm 1.4\%$.

184 Changes in best jumping performance were best fitted by damped sinusoidal wave
185 model compared to Banister model. DHO model is more accurate than Banister model.
186 Mean R^2 for CMJ is $.80 \pm .24$ (range from .32 to .97) vs. $.69 \pm .20$ (range from .40 to .82)
187 respectively (Table 4). Mean R^2 for 4sCMJ is $.86 \pm .09$ (range from .74 to .96) vs. $.67 \pm .29$
188 (range from .19 to .99) respectively (Table 5). The data are randomly distributed around
189 the best-fit curve for each model (Figure 4 show the modeled variations in DPC and CMJ
190 performance for players P4).

191 Additionally, throughout the training period, the damping parameter θ and the
192 period T were positively correlated with age ($\rho = .81$, $p < .05$ and $\rho = .86$, $p < .02$
193 respectively) and the number of recovery days was significantly correlated with the period
194 T ($\rho = .86$, $p < .02$).

195 **Discussion**

196 To the best of our knowledge, this study is the first to present a framework to
197 model the effects of daily training on performance capacity based on a sine wave pattern
198 (damped harmonic oscillations). The results demonstrate that DHO model is excellent at
199 modelling DPC on the basis of training data. The DHO model considers the cumulative

200 DPC as (i) the sum of the delayed DPCs from the consecutive training and recovery days
201 and (ii) a non-linear and non-monotone process over a full season. Both decreases and
202 increases in DPC could be considered as the expression of the process of accumulation and
203 dissipation of fatigue induced by successive training workouts. DPC is thus directly
204 dependent on the TL.

205 The vertical jump is involved in most volleyball skills and is a discriminatory factor
206 at a high level^{15,16,20}. Bobbert and al.²¹ showed that (i) the ability to jump was correlated
207 with fatigue and (ii) decreased performance was partly due to a mismatch between
208 neuromuscular control and musculoskeletal properties. Hence, the CMJ and the 4sCMJ
209 seems to be valid tests to be used to individualize the model's parameters and to measure
210 changes in DPC in volleyball.

211 Hence, DPC on the day n should reflect the cumulative, delayed TLs effect's from
212 all previous training days. The variations over time in DPC appear to be similar to
213 biological rhythms; the shape of the variation (i.e. the cycle) does not depend on the scale
214 (i.e. the amplitude and period). However, the physiological validity of the model should be
215 clearly explained. The values of θ and T in our model are similar to those found in the
216 literature on modeling the effects of training. Our values for the damping parameter θ are
217 similar to the lowest values of the τ_2 fatigue parameter in Banister's two-component model
218 (2 ± 2 days for eight untrained subjects⁶ and 4 and 6 days for two amateur cyclists⁵).
219 However, our T values are similar to the upper boundary of the τ_2 fatigue parameter (11
220 days in two untrained subjects²², 13 ± 3 days for six untrained subjects⁵, and 12 ± 6 days
221 for 18 high-level swimmers²³).

222 The similitude between the value of θ in our model and the τ_2 fatigue parameter in
223 Banister's model suggests that the DPC is highly dependent on the level of fatigue.
224 Furthermore, there was no correlation with Banister's τ_1 fitness parameter (i.e. 38 ± 9 days⁶
225 and 60 days⁵). Thus DPC is then regarded as inversely related to the level of fatigue and
226 not as the difference between fitness and fatigue. As a consequence, DPC is more about
227 absence of fatigue than improved capacity and very dependent on the amplitude of the TL
228 (as elite athletes have very little room to improve capacity). Quantify TL is thereby
229 important suggesting that the pattern of DPC could be assessed as a function of TL. For
230 example, Hellard and al.¹⁹ showed that over the course of the swimmers' athletic careers,
231 better performances were obtained by an increase in TL during the overload period and

232 then a sharper decrease in the taper period. More experienced athletes can recover more
233 rapidly than less experienced athletes.

234 The structure of the iterative calculation also suggested that (i) DPC is the sum of
235 the delayed effects of the previous training days (which can be positive or negative) and
236 (ii) variations in DPC are non-monotonic and non-linear, with a relatively short period (i.e.
237 between 7 and 13 days). The cyclic nature of the variation in DPC means that coaches
238 should focus on the recovery process too (i.e. the decrease in TL) as well as the training
239 process (i.e. the increase in TL). Several studies^{1,23,24,25} found that the training/recovery
240 relationship was a weighting factor for variations in performance.

241 The high goodness of fit (Table 4 and table 5) observed in the present study
242 (moderately more than Banister model for CMJ and significantly more than Banister
243 model for 4sCMJ) suggest that the concept of fatigue is very important - not only as a
244 precursor of performance, but also as a marker of the limits that must not be exceeded too
245 often if the risk of overreaching or overtraining is kept to a minimum (i.e. asymptotic
246 values). The mean R^2 of DHO model ($.80 \pm .24$ for CMJ and $.86 \pm .09$ for 4sCMJ) and
247 mean MSE ($.45 \pm .49$ for CMJ and $.25 \pm .23$ for 4sCMJ) for all players were more accurate
248 than those reported by Mujika and al.^{23,25} with Banister model. It is interesting to note that
249 the goodness of fit is even more accurate with the 4sCMJ that is a test closer to the activity
250 of volleyball (R^2 range: 0.74 to 0.96; mean: 0.86 ± 0.09). However, it is not yet clear
251 whether this fatigue is acute or chronic.

252 The T value (ranged from 7 to 13 days) can be related to a meta-analysis of
253 tapering studies²⁶, in which 8 and 15 days appeared to be the limits between the positive
254 influence of fatigue disappearance and the negative influence of detraining²⁶. Considering
255 periodization as the organization of TL over time, the production of an optimal level of
256 fatigue during the preparation days (weeks/phases) and the reduction of fatigue for a few
257 days (weeks) before the competition are key moments intended to synchronize peak DPC
258 with days of competition. Thus, Le Meur and al.⁴ showed that increases of the TL and
259 performance were not linear. A short period of functional overload caused a lesser
260 performance improvement (4.2 % for the control group vs. 2.4 % for the overreaching
261 functional group).

262 The findings of the present study show that within a team, individual athletes differ

263 in their training responses. The correlations between the period T and the θ damping
264 parameter on one hand and age on the other might be due to the changes in physiological
265 parameters that characterize human capabilities. Donato and al.²⁶ stated that (i) the rates of
266 decline in swimming performance with age are greater in longer-duration events than in
267 short-duration events (suggesting relatively small loss of anaerobic muscle power with age,
268 compared with cardiovascular endurance) and (ii) the variability of the age-related decline
269 in performance increases markedly with advancing age. Berthelot G and al.¹¹ considered
270 that these processes were similar and did not depend on the sport, gender, environment or
271 principal anatomic–physiological medium, since changes in physiological parameters are
272 most strongly related to the effect of time on all living things. However, it is important to
273 note that the standard deviation of our study is of only 2.4 years, which is relatively low.
274 The need for individualized parameters in our model reinforces the hypotheses whereby (i)
275 training adaptation is an individual skill²⁶ and (ii) DPC is time-dependent. Our observation
276 of a DPC time structure is an additional argument in favor of structuring and planning the
277 training workouts because the same given workout does not produce the same fatigue (and
278 therefore the same adaptations) in all athletes at different times. This is especially relevant
279 as the number of years spent at a high sporting level increase²⁷. Hellard and al.¹⁹ suggest
280 that, over the course of the swimmers' athletic careers, training schedules should change,
281 with an increase in training load, but need to be adapted according to the individual
282 responses of each athlete.

283 The good correlations between the two components of our model on one hand and
284 the players' age on the other prompts us to postulate that expertise (i.e. the number of years
285 playing at a high level) has a major influence on DPC¹¹ and may reflect variations in
286 muscle performance and fatigability. In a review of the literature Kraemer and al.⁷ shows
287 that muscular strength increases approximately 40% in untrained, 20% in moderately
288 trained, 16% in trained, 10% in advanced, and 2% in elite over periods ranging from 4
289 weeks to 2 years. Experienced players of our study had a period of oscillation longer than
290 the less experienced players. They also have a greater damping parameter and
291 consequently a less important overcompensation. Then, DHO model seems well to
292 highlight that TL must be progressively increased throughout a player's career to provide
293 performance capacity increases.

294 At least but not last, the two parameters are the key feature of the new modeling

295 framework too. The current criterion standard model, the IR model (e.g. Banister and
296 Calvert model), requires the fitting of five parameters, which often results in the
297 parameters being correlated and non identifiable. To define the initial parameters of the
298 model, the athlete must perform a sufficient number of tests. This induces a latency of
299 about three weeks. However, this only applies to the first use of the model by the athlete
300 because two tests per week may be sufficient. As mentioned by Hellard and al.²⁸, the most
301 direct and obvious means to improve conditioning is through the collection and use of
302 additional data. But it is rarely possible in studies to deal with elite players. Nevertheless,
303 the mean error of performances requires conducting further research to assess accuracy and
304 stability of the DHO model and to confirm the validation and reliability of this model in
305 other high-level sports, in order to provide (i) a better understanding of the effects of
306 training on performance and (ii) clearly explain the physiological validity. However, it is
307 also necessary to verify whether the individual parameters change over the course of the
308 season due to variations of fitness.

309 **Conclusions and practical applications**

310 Specifically, in elite team sport athletes the positive and negative effects of training
311 often cause apparent oscillations in performance, which makes the sinusoidal function an
312 appealing one. Therefore, monitoring TL is fundamental to obtain optimal results and
313 synchronize performance peaks with competitions. A novel model accurately describes
314 individual delayed and cumulative effects of the TL on DPC. The present results provide
315 support for the use of the sRPE and the DHO model as an estimate of TL and delayed
316 cumulative effects of training. DPC is more about absence of fatigue than improved
317 capacity and very dependent on the amplitude of the TL (as elite athletes have very little
318 room to improve capacity). Quantify TL is thereby important suggesting that the pattern of
319 DPC could be assessed as a function of TL. DHO model allows to gauge the effectiveness
320 of periodization and to evaluate the empirical training principles (e.g. charge-discharge).
321 Implemented in software, the algorithm can be used to calculate a simulation of several
322 profile of weekly TL or the most effective tapering strategies to peak when it count²⁹.
323 Program directors, coaches, trainers participating in training design should have an interest
324 for this tool which makes planning and monitoring of training process more effective.

325 **Acknowledgement**

326 The authors are grateful to all the players and coaching staff on the VolleyBall
327 Nantes team for participating in this study. The authors would also like to extend our
328 gratitude to Pierre-Yves Jeuland from TrainingLoad Pro for the use of the online training
329 diary.

References

1. Issurin VB. New horizons for the methodology and physiology of training periodization. *Sports Med.* 2010;40(3):189-206.
2. Banister EW, Calvert TW, Savage MV, Bach T. A systems model of training for athletic performance. *Aust J Med Sport.* 1975;7: 57-61
3. Calvert TW, Banister EW, Savage MV, Bach T. A systems model of the effects of training on physical performance. *IEEE Trans Syst Man Cybern.* 1976;6(2):94-102
4. Le Meur Y, Louis J, Aubry A, Gueneron J, Pichon AP, Schaal K, Corcuff JB, Hatem S, Isnard R, Hausswirth C. Maximal exercise limitation in functionally overreached triathletes: role of cardiac adrenergic stimulation. *J App Physiol.* 2014;117(3):214-22.
5. Busso T, Denis C, Bonnefoy R, Geysant A, Lacour JR. Modeling of adaptations to physical training by using a recursive least squares algorithm. *J Appl Physiol.* 1997;82(5):1685-93
6. Busso T, Carasso C, Lacour JR. Adequacy of a systems structure in the modeling of training effects on performance. *J Appl Physiol.* 1991;71(5):2044-2049
7. Kraemer WJ, Adams K, Cafarelli E, Dudley GA, Dooly C, Feigenbaum MS, Triplett-McBride T. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34(2):364-380
8. Harries SK, Lubans DR, Callister R. Systematic Review and Meta-Analysis of Linear and Undulating Periodized Resistance Training Programs on Muscular Strength. *J Strength Cond Res.* 2014;29(4):1113-29
9. Reilly T, Atkinson G, Edwards B, Waterhouse J, Farrelly K, Fairhurst E. Diurnal variation in temperature, mental and physical performance, and tasks specifically related to football (soccer). *Chronobiol Int.* 2007;24(3):507-19
10. Reilly T, Atkinson G, Gregson W, Drust B, Forsyth J, Edwards B, Waterhouse J. Some chronobiological considerations related to physical exercise. *Clin Ter.* 2006;157(3):249-64
11. Berthelot G, Len S, Hellard P, Tafflet M, Guillaume M, Vollmer JC, Gager B, Quinquis L, Marc A, Toussaint JF. Exponential growth combined with exponential decline explains lifetime performance evolution in individual and human species. *Age.* 2012;34(4):1001-9
12. Edelmann-nusser J, Hohmann A, Henneberg B. Modeling and prediction of competitive performance in swimming upon neural networks. *Eur J Sport Sci.* 2002; 2(2): 1-10

13. Foster C, Hector LL, Welsh R, Schragger M, Green MA, Snyder AC. Effects of specific versus cross-training on running performance. *Eur J Appl Physiol.* 1995;70:367-372
14. Marcelino R, Mesquita I, Sampaio J. Effects of quality of opposition and match status on technical and tactical performances in elite volleyball. *J Sports Sci.* 2011;29(7):733-41
15. Sheppard JM, Chapman D, Gough C, McGuigan M, Newton RU. The association between changes in vertical jump and changes in strength and power qualities in elite volleyball players over 1 year. *J Strength Cond Res.* 2008;22(6):1-115
16. Sheppard JM, Chapman D, Gough C, McGuigan M, Newton RU. Twelve month training induced changes in elite international volleyball players. *J Strength Cond Res.* 2009a ;23(7):2096-2101
17. Sheppard JM, Gabbett T, Stanganelli L. An analysis of playing positions in elite men's volleyball: Considerations for competition demands and physiological characteristics. *J Strength Cond Res.* 2009b;23(6):1858-66
18. Nelson W, Tong YL, Lee JK, Halberg F. Methods for cosinor rhythmometry. *Chronobiol.* 1979;6:305-23
19. Hellard P, Avalos M, Lacoste L, Barale F, Chatard JC, Millet GP. Assessing the limitations of the Banister model in monitoring training. *J Sports Sci.* 2006;24(5):509-20
20. Winget CM, DeRoshia CW, Holley DC. Circadian rhythms and athletic performance. *Med Sci Sports Exerc.* 1985;17(5):498-516
21. Bobbert MF, Van der Krogt MM, Van Doorn H, de Ruiten CJ. Effects of fatigue of plantar flexors on control and performance in vertical jumping. *Med Sci Sports Exerc.* 2011;43(4):673-84
22. Morton RH, Fitz-Clarke JR, Banister EW. Modeling human performance in running. *J Appl Physiol.* 1985;69(3):1171-7
23. Mujika I, Chatard JC, Busso T, Geysant A, Barale F, Lacoste L. Effects of training on performance in competitive swimming. *Can J Appl Physiol.* 1995;20(4): 395-406
24. Busso T, Benoit H, Bonnefoy R, Feasson L, Lacour JR. Effects of training frequency on the dynamics of performance response to a single training bout. *J Appl Physiol.* 2002;92(2):572-80
25. Mujika I, Chatard JC, Busso T, Geysant A. Use of swim-training profiles and performance data to enhance training effectiveness. *J Swimming Res.* 1996;11:23-29
26. Donato AJ, Tench K, Glueck DH, Seals DR, Eskurza I, Tanaka H. Declines in physiological functional capacity with age: a longitudinal study in peak swimming performance. *J Appl Physiol.* 2003;94(2):764-9
27. Granados C, Izquierdo M, Ibanez J, Ruesta M, Gorostiaga EM. Are there any differences in physical fitness and throwing velocity between national and international elite female handball players. *J Strength Cond Res.* 2013;27(3):723-32

28. Hellard P, Avalos M, Hauswirth C, Pyne D, Toussaint JF, Mujika I. Identifying optimal overload and taper in elite swimmers over time. *J Sports Sci Med.* 2013;12(4):668-78
29. Bosquet L, Montpetit J, Arvisais D, Mujika I. Effects of tapering on performance: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39(8):1358-65

Table 1: Individual player's countermovement jump (CMJ) and four-step countermovement jump (4sCMJ) performances that had occurred over the nine-month period for the six female volleyball players (P1, P2, P3, P4, P5 and P6)

	CMJ				4sCMJ			
	Best	Poorer	Mean	SD	Best	Poorer	Mean	SD
P1	47.1	41,5	45.0	1.6	51.5	45.9	49.5	1.7
P2	48.2	43.3	44.9	1.6	52.9	49.0	50.4	1.4
P3	49.4	45.9	48.1	1.3	54.5	52.1	53.0	0.8
P4	47.6	42.4	45.8	1.5	52.4	46.0	49.8	2.3
P5	51.8	44.4	47.0	2.3	55.7	51	53.8	1.6
P6	45.8	40.8	42.8	1.9	51.2	45.5	48.3	2.2
Mean	48.3	43.1	45.6	1.7	53.0	48.3	50.8	1.7
SD	2.1	1.9	1.8	0.4	1.8	2.9	2.1	0.6

Note : Values are expressed in cm.

Table 2: Individual player's DHO model parameter measured over the nine-month period.

	DPC model parameters			sCMJ		rCMJ	
	Age	Damping θ	Period T	τ	p	τ	p
J1	27	6	13	0.61	0.02	0.55	0.03
J2	19	5	9	0.71	0.01	0.73	0.03
J3	23	6	12	0.58	0.01	0.52	0.05
J4	23	7	12	0.70	0.01	0.78	0.01
J5	18	5	9	0.57	0.04	0.66	0.01
J6	19	5	7	0.72	0.01	NS	NS
Moy.	22	6	10	0.63	0.02	0.64	0.03
EC.	3	1	2	0.07	0.01	0.11	0.01

Note: τ = Kendall's coefficient for standing and running countermovement jump (sCMJ and rCMJ). Values for damping parameter θ and period T are expressed in arbitrary units and days, respectively.

Table 3: Individual player's parameters of the model of Banister.

	k_a	k_f	τ_a	τ_f
P1	0.015	0.041	20	6
P2	0.031	0.071	18	8
P3	0.025	0.092	20	5
P4	0.004	0.010	13	7
P5	0.028	0.131	25	8
P6	0.011	0.044	30	7
Mean	0.019	0.065	21	7
SD	0.011	0.043	6	1

Note : τ_a and τ_f are the fitness and fatigue time constants. k_a and k_f are the fitness and fatigue multiplying factors. Values are expressed in arbitrary units.

Table 4: Goodness of fit of the DHO model and Banister model with CMJ.

	DHO Model				Banister Model			
	R ²	MSE	d	p-value	R ²	MSE	d	p-value
P1	0.93	0.09	4	0.72	0.82	0.41	4	0.75
P2	0.85	0.67	4	0.82	0.40	2.68	4	0.25
P3	0.32	1.35	3	0.07	0.46	1.07	4	0.66
P4	0.85	0.29	4	0.92	0.82	0.35	4	0.23
P5	0.89	0.22	4	0.15	0.82	0.35	4	0.33
P6	0.97	0.06	3	0.24	0.81	0.48	4	0.53
Mean	0.80	0.45	3.67	0.49	0.69	0.67	4	0.46
SD	0.24	0.49	0.52	0.37	0.20	0.19	0	0.22

Note: R² = coefficient of determination. MSE = mean square error. d = polynomial degree of non-linear regression. p-value of Shapiro-Wilk test are also reported.

Table 5: Goodness of fit of the DHO model and Banister model with 4sCMJ

	DHO Model				Banister Model			
	R ²	MSE	d	p-value	R ²	MSE	d	p-value
P1	0.93	0.09	4	0.72	0.82	0.41	4	0.74
P2	0.78	0.01	3	0.44	0.19	0.03	4	0.56
P3	0.88	0.25	3	0.64	0.58	0.97	3	0.12
P4	0.89	0.22	3	0.06	0.56	1.16	4	0.48
P5	0.74	0.68	4	0.67	0.85	0.39	4	0.60
P6	0.96	0.24	4	0.70	0.99	0.03	4	0.65
Mean	0.86	0.25	3.50	0.54	0.67	0.57	3.83	0.53
SD	0.09	0.23	0.55	0.26	0.29	0.34	0.41	0.22

Note: R² = coefficient of determination. MSE = mean square error. d = polynomial degree of non-linear regression. p-value of Shapiro-Wilk test are also reported.

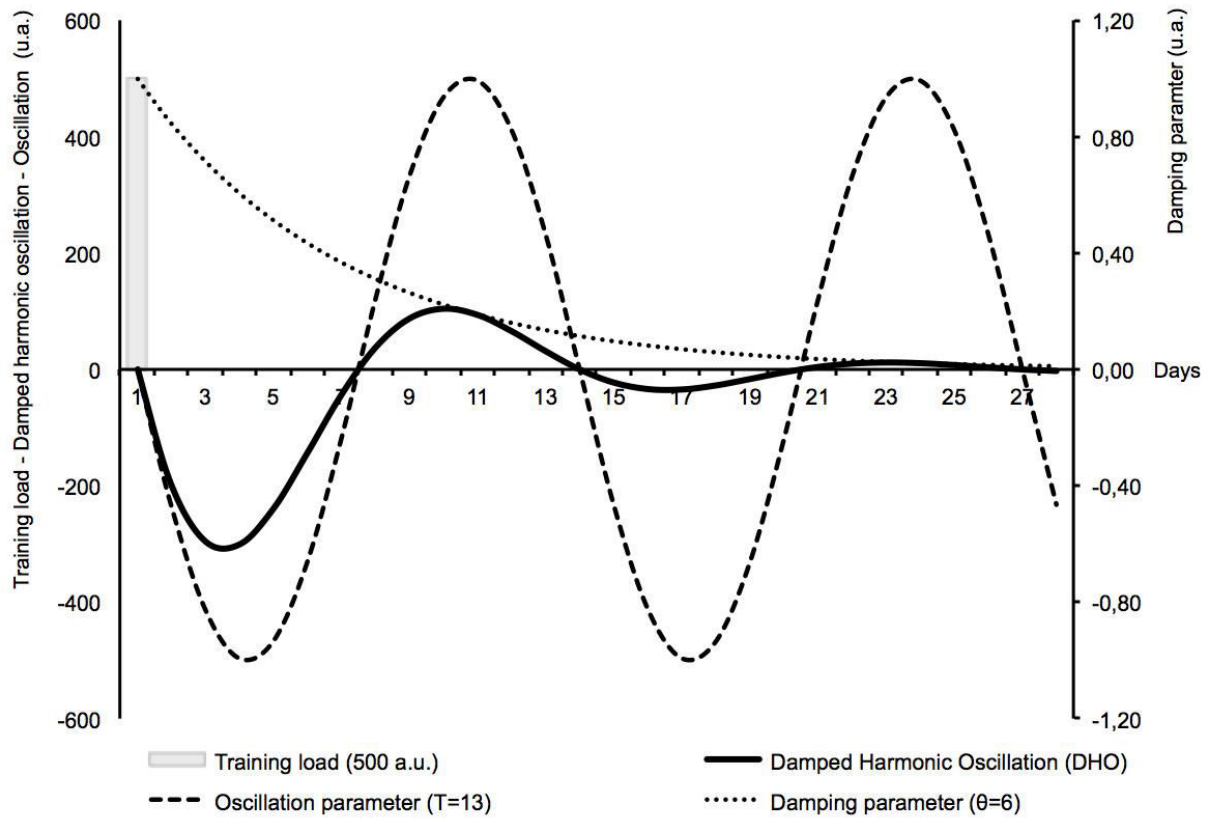


Figure 1: Performance capacity (damped harmonic oscillation) for a 500 AU training day, with 6 AU as damping parameter and 13 days as period parameter. The curve of the performance capacity is the product of points on the Oscillation curve multiplied by points of the Damping parameter curve

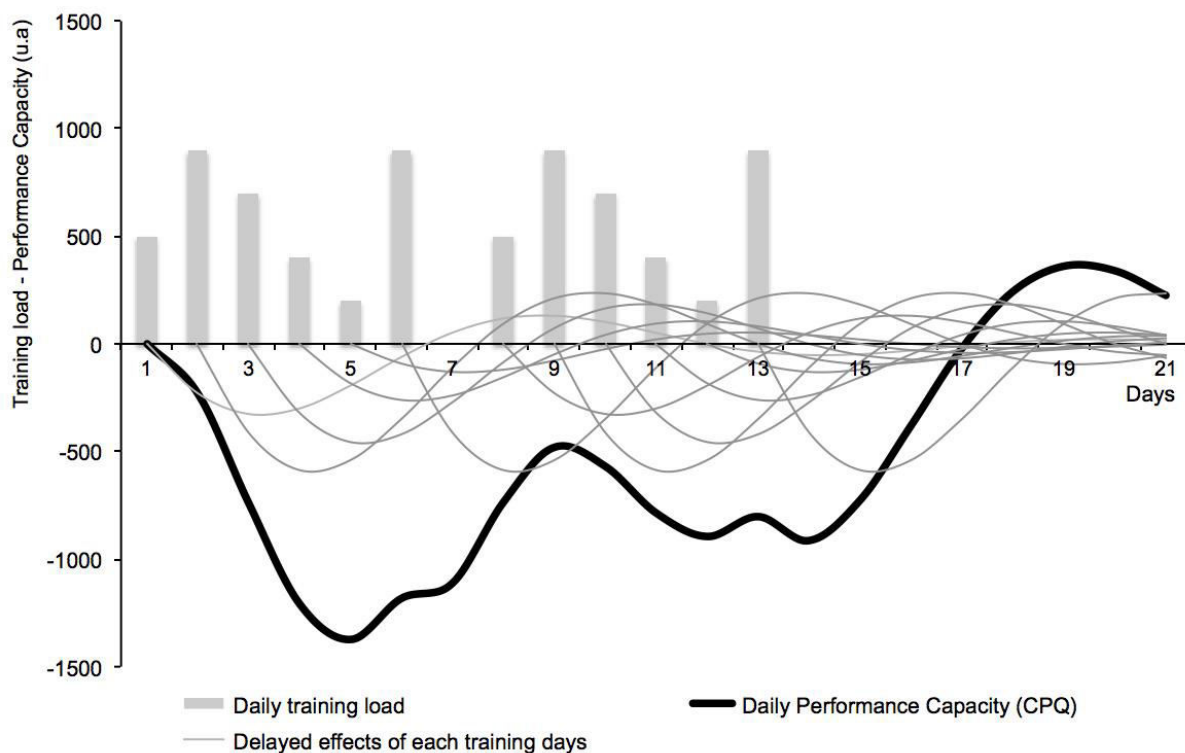


Figure 2: Performance capacity (delayed cumulative training effects) for consecutive training days and recovery days. The Daily Performance Capacity is the daily cumulative sum of the Delayed Effects of each training days.

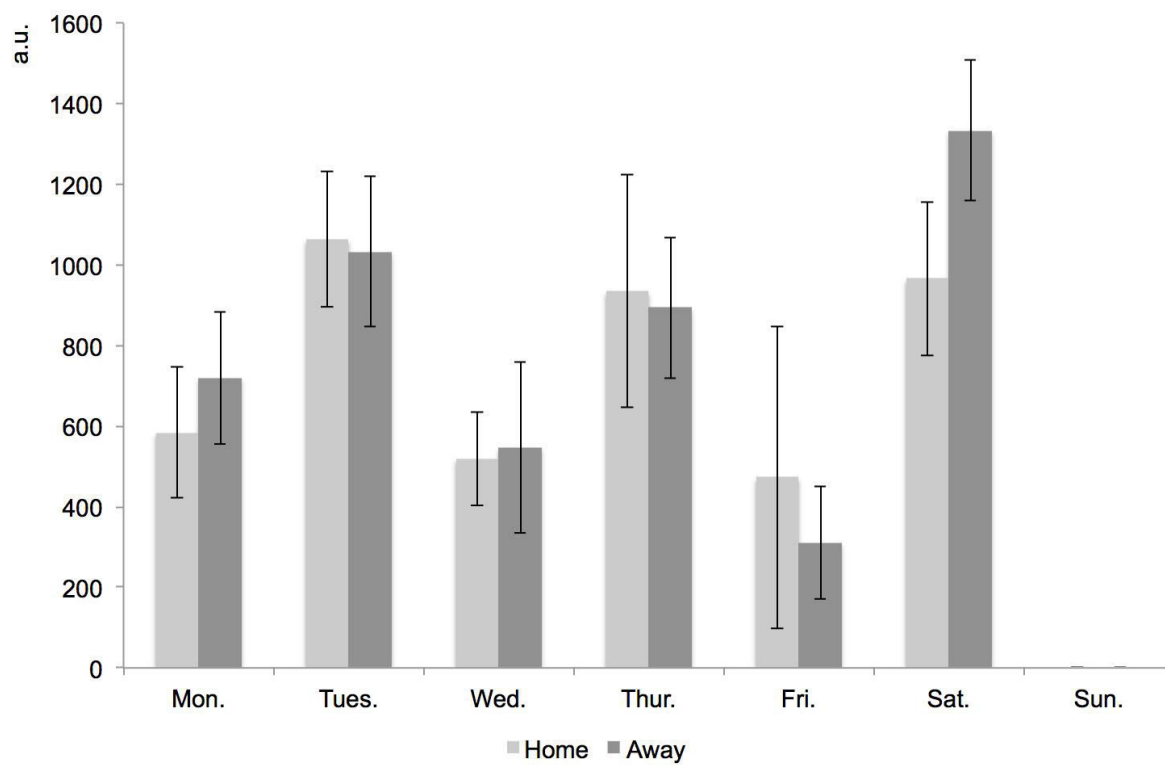


Figure 3 : Session-rate of perceived exertion (sRPE) training load (TL) profile of the training week (home and away games)

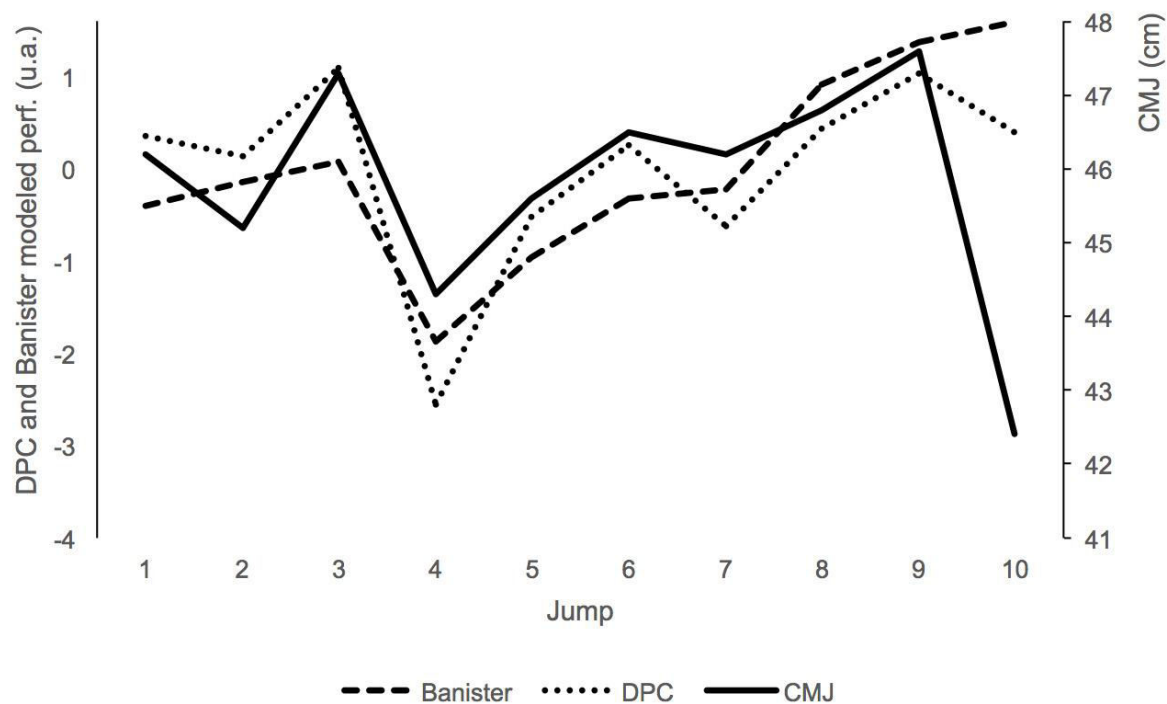


Figure 4: Modeled daily performance capacity (DPC), modeled Banister performance and CMJ performance for volleyball player P4, over a nine-month period. Banister predicted performance and DPC are expressed in normalized arbitrary units.

Brevet - Dépôt contrôlé

Morin, S. (2013). Dépôt contrôlé IDDN.FR.001.41007.000.S.P.2013.000.31500
Université de NANTES, 1 quai de Tourville, BP13522, 44032 NANTES CEDEX 01

Inter Deposit Digital Number Certificat délivré par Agence pour la Protection des Programmes 54 rue de Paradis - 75010 PARIS - FRANCE / T. +33(0)1 40 35 03 03 / F. +33(0)1 40 38 96 43 IDDN.FR.001.41007.000.S.P.2013.000.31500 (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) Pour l'œuvre : TrainingLoad Pro version 1.0 en date du 1er avril 2013				Logibox conservée par l'adhérent : 77336 Logibox conservée par l'APP : 77337	
Identité du(des) titulaire(s) de droits : UNIVERSITÉ DE NANTES 1 quai de Tourville BP 13522 44035 NANTES CEDEX 01 Siren : 194408843		Fait à Paris, le 07/10/2013			
Adhérent sous le numéro : 10.44.13368 Support utilisé : 1 CD en double exemplaire		Le titulaire *		Zone réservée (Clic d'intégrité) T. +33(0)1 40 38 96 43 F. +33(0)1 40 38 96 43 APP.ASSO.FR	
(1) Inter Deposit Digital Number (2) Nationalité de l'œuvre (3) Numéro de l'organisme d'enregistrement (4) Numéro d'ordre de l'enregistrement (5) Numéro de version (6) Type d'enregistrement (7) Type de l'œuvre (8) Année d'enregistrement (9) Type de l'œuvre (10) Année d'enregistrement		* Le titulaire s'engage à informer l'APP de toute cession ou affectation, totale ou partielle, de ses droits de propriété intellectuelle. Seules les inscriptions de type S et C permettent un éventuel accès au programme source.			

Création de la société Trainingload Pro

Greffes du Tribunal de Commerce de Nantes
Immeuble Rhuys
2 bis quai François Mitterrand
BP 86209
44262 Nantes CEDEX 2

Extrait Kbis

EXTRAIT D'IMMATRICULATION AU REGISTRE DU COMMERCE ET DES SOCIÉTÉS

au 04 Septembre 2014

IDENTIFICATION

Dénomination sociale	TRAININGLOAD PRO
Sigle	TLP
Numéro d'immatriculation	803 757 855 R.C.S. Nantes
Date d'immatriculation	01/09/2014

RENSEIGNEMENTS RELATIFS A LA PERSONNE MORALE

Adresse du siège	Bâtiment B 2 rue de Mauves 44470 Thouare Sur Loire
Forme juridique	Société par actions simplifiée
Capital	4 000,00 Euros
Date de clôture de l'exercice social	31 décembre
Date de clôture du 1er exercice social	31/12/2015
Durée de la personne morale	Jusqu'au 31/08/2113
Constitution	Au greffe du Tribunal de Commerce de Nantes
Dépôt d'actes constitutifs	N° 9329 du 01/09/2014

GESTION, DIRECTION, ADMINISTRATION, CONTRÔLE

Président

Nom / Prénoms	JEULAND Pierre-Yves Elie
Date et lieu de naissance	Le 24/03/1986 à Angers (49)
Nationalité	Française
Demeurant	Bâtiment B 2 rue de Mauves 44470 Thouare Sur Loire

Directeur général

Nom / Prénoms	DUVIVIER Dominique Loïc
Date et lieu de naissance	Le 30/06/1970 à Rennes (35)
Nationalité	Française
Demeurant	42 rue de la Bouessiere 35470 Plechatel

Administrateur

Nom / Prénoms	MORIN Stéphane Nicolas
Date et lieu de naissance	Le 22/05/1967 à Civray (86)
Nationalité	Française
Demeurant	20 rue Picasso 35320 Le Sel de Bretagne

Administrateur

Nom / Prénoms	BROUARD Hervé
Date et lieu de naissance	Le 13/06/1967 à Désertines (53)
Nationalité	Française

Greffes du Tribunal de Commerce de Nantes GM 05/09/2014 13:50:55 Page 1/2 (1) *140913578*

TRAININGLOAD PRO
RCS 803 757 855 (2014B01984)

Demeurant

20 rue Paul Cézanne 56890 Saint Ave

Administrateur

Nom / Prénoms

JEULAND Pierre-Yves Elie

Date et lieu de naissance

Le 24/03/1986 à Angers (49)

Nationalité

Française

Demeurant

Bâtiment B 2 rue de Mauves 44470 Thouare Sur Loire

Administrateur

Nom / Prénoms

DUVIVIER Dominique Loïc

Date et lieu de naissance

Le 30/06/1970 à Rennes (35)

Nationalité

Française

Demeurant

42 rue de la Bohessière 35470 Plechatel

RENSEIGNEMENTS RELATIFS A L'ETABLISSEMENT PRINCIPAL ET A L'ACTIVITE

Adresse de l'établissement principal

Bâtiment B 2 rue de Mauves 44470 Thouare Sur Loire

Activités exercées dans l'établissement

Expertise conseil formation et encadrement en activité physique et sportive

Date de début d'activité

12/05/2014

Origine du fonds ou de l'activité

Création

Mode d'exploitation

Exploitation directe

Le Greffier



Signature

FIN DE L'EXTRAIT

05/09/2014 13:50:55 - N° de gestion : 2014B01984

ANNEXES

1) Valeurs quotidiennes

4.7- NOMBRE DE SEANCES

Les moyennes pour le nombre de jours d'entraînement, de jours de repos, de jours d'entraînement avec des douleurs étaient de $154,2 \pm 5,3$, de $65,8 \pm 5,3$, et de $44 \pm 27,2$ jours, respectivement. Une trêve de dix jours a eu lieu du 19 au 29 décembre 2012.

Code	Jours d'entraînement	Jours de repos	%	Jours avec des douleurs	%
J1	151	69	46 %	94,0	62 %
J2	153	67	44 %	46,0	30 %
J3	156	64	41 %	16,0	10 %
J4	150	70	47 %	41,0	27 %
J5	164	56	34 %	24,0	15 %
J6	151	69	46 %	43,0	28 %
Moyenne	154	66	43 %	44	29 %
Écart-type	5	5	5 %	27	18 %

Tableau 1 : Nombre de jours d'entraînement, de jours de repos, de jours avec douleurs

4.8- CHARGE

Les moyennes pour la CE record et la CE moyenne étaient de 2335 ± 181 et de $882,5 \pm 117$ u.a., respectivement. Les records ont été réalisés durant la période de préparation (PP) avant reprise du championnat.

Code	Charge record	Charge moyenne	σ	%
J1	2220	996	459	45 %
J2	2120	858	404	40 %
J3	2420	737	408	30 %
J4	2530	937	466	37 %
J5	2190	759	433	35 %
J6	2530	1008	503	40 %
Moyenne	2335	883	446	38 %
Écart-type	181	117	38	5 %

Tableau 2 : Charge d'entraînement maximum et charge d'entraînement moyenne

(valeurs quotidiennes)

4.9- VOLUME

Les moyennes pour la durée quotidienne record et la durée quotidienne moyenne étaient de $213.3 \pm 2,6$ et de $115.5 \pm 7,1$ minutes, respectivement. Les entraînements étant collectifs cela explique les très faibles écarts-types.

Code	Durée re-cord	Durée moyenne	σ	%
J1	210	124	42	59 %
J2	215	108	30	50 %
J3	215	110	30	51 %
J4	210	111	29	53 %
J5	215	116	45	54 %
J6	215	124	39	58 %
Moyenne	213	116	36	54 %
Écart-type	3	7	7	4 %

Tableau 3 : Durée maximum et moyenne de durée des entraînements (valeurs quotidiennes)

4.10- INTENSITE MOYENNE

Les moyennes pour les niveaux d'intensité moyenne quotidienne record et l'intensité moyenne quotidienne étaient de $8,3 \pm 0,8$ et de $5 \pm 1,3$ u.a., respectivement.

Code	Intensité record	Intensité moyenne	σ	%
J1	9	5,5	1,2	61 %
J2	8	6,8	1,4	84 %
J3	8	3,8	1,0	47 %
J4	9	3,5	1,6	39 %
J5	7	4,5	1,0	64 %
J6	9	5,8	1,5	65 %
Moyenne	8,3	5,0	1,3	60 %
Écart-type	0,8	1,3	0,3	16 %

Tableau 4 : Intensité moyenne maximum et moyenne de l'intensité moyenne (valeurs quotidiennes)

4.11- INTENSITE MAXIMALE

Les moyennes pour les valeurs maximale et moyenne du niveau d'intensité maximale perçue quotidien étaient de $9,7 \pm 0,5$ et de $5,6 \pm 1,2$ u.a., respectivement.

Code	Intensité maximale			
	Maximum	Minimum	Moyenne	Écart-type
J1	10	2	4,9	2,1
J2	10	3	7,3	1,5
J3	10	2	4,9	2,1
J4	9	1	4,2	2,1
J5	9	1	5,8	2,1
J6	10	2	6,7	1,9
Moyenne	9,7	1,8	5,6	2,0
Écart-type	0,5	0,8	1,2	0,2

Tableau 5 : Intensité maximale perçue maximum et moyenne de l'intensité maximale perçue (valeurs quotidiennes)

4.12- MAITRISE TECHNIQUE/TACTIQUE

Les moyennes pour les valeurs maximale et moyenne du niveau de maîtrise technique/tactique perçue quotidienne étaient de $8,8 \pm 1,5$ et de $4,7 \pm 1$ point, respectivement.

Code	Maîtrise technique/tactique			
	Maximum	Minimum	Moyenne	Écart-type
J1	9	1	3,5	1,6
J2	9	2	5,4	1,2
J3	9	2	4,6	1,2
J4	10	2	6,2	2,0
J5	6	1	3,6	1,3
J6	10	2	5,1	2,1
Moyenne	8,8	1,7	4,7	1,6
Écart-type	1,5	0,5	1,0	0,4

Tableau 6 : Maîtrise technique et tactique perçue maximum et moyenne de la maîtrise technique et tactique perçue (valeurs quotidiennes)

4.13- FATIGUE

Les moyennes pour les valeurs maximale et moyenne du niveau de fatigue perçue quotidienne étaient de $9,2\pm 1$ et de $5\pm 0,9$ u.a., respectivement.

Code	Fatigue			
	Maximum	Minimum	Moyenne	Écart-type
J1	10	1	4,8	2,1
J2	8	1	4,0	1,3
J3	9	2	4,3	1,2
J4	10	1	5,9	2,3
J5	8	1	4,7	1,7
J6	10	1	6,1	1,9
Moyenne	9,2	1,2	5,0	1,7
Écart-type	1,0	0,4	0,9	0,4

Tableau 7 : Fatigue perçue maximum et moyenne de la fatigue perçue (valeurs quotidiennes)

4.14- ENDORMISSEMENT

Les moyennes pour les valeurs maximale et moyenne de qualité d'endormissement perçu quotidien étaient de $9,2\pm 1$ et de $5\pm 0,9$ u.a., respectivement.

Code	Endormissement			
	Maximum	Minimum	Moyenne	Écart-type
J1	9	1	1,8	1,4
J2	10	1	3,2	1,5
J3	8	1	3,3	1,2
J4	10	1	3,3	2,3
J5	9	1	4,9	2,2
J6	10	1	6,4	2,6
Moyenne	9,3	1,0	3,8	1,9
Écart-type	0,8	0,0	1,6	0,6

Tableau 8 : Endormissement perçu maximum et moyenne de l'endormissement perçu (valeurs quotidiennes)

4.15- SOMMEIL

Les moyennes pour les valeurs maximale et moyenne de qualité du sommeil perçu quotidien étaient de $8,7 \pm 0,8$ et de $3,8 \pm 1,4$ points, respectivement.

Code	Sommeil			
	Maximum	Minimum	Moyenne	Écart-type
J1	8	1	1,8	1,4
J2	9	1	3,6	1,3
J3	8	1	3,2	1,1
J4	9	1	3,2	2,2
J5	8	2	5,7	1,3
J6	10	1	5,2	2,3
Moyenne	8,7	1,2	3,8	1,6
Écart-type	0,8	0,4	1,4	0,5

Tableau 9 : Sommeil perçu maximum et moyenne du sommeil perçu (valeurs quotidiennes)

4.16- ÉTAT D'ESPRIT

Les moyennes pour les valeurs maximale et moyenne du niveau d'état d'esprit perçu quotidien étaient de $9 \pm 1,5$ et de $4,7 \pm 1$ u.a., respectivement.

Code	État d'esprit			
	Maximum	Minimum	Moyenne	Écart-type
J1	10	1	4,6	2,5
J2	9	1	4,6	1,3
J3	9	2	4,5	1,6
J4	10	1	5,5	2,5
J5	6	1	2,9	1,3
J6	10	1	5,9	2,2
Moyenne	9,0	1,2	4,7	1,9
Écart-type	1,5	0,4	1,0	0,6

Tableau 10 : État d'esprit perçu maximum et moyenne de l'état d'esprit perçu (valeurs quotidiennes)

4.17- DOULEURS (TOTAL)

Les moyennes pour les valeurs maximale et moyenne du total de points de douleurs quotidiennes étaient de $15,5 \pm 7,7$ et de $4,6 \pm 2,5$ u.a., respectivement.

Code	Douleurs (total)			
	Maximum	Minimum	Moyenne	Écart-type
J1	25	0	4	4,6
J2	9	1	3,3	2,1
J3	11	4	6,7	2,6
J4	25	0	7,5	6,7
J5	8	0	0,6	1,6
J6	15	2	5,7	2,7
Moyenne	15,5	1,2	4,6	3,4
Écart-type	7,7	1,6	2,5	1,9

Tableau 11 : Total de douleurs perçues maximum et moyenne du total de douleurs perçues (valeurs quotidiennes)

4.18- DOULEURS (U.A./S)

Les moyennes pour les valeurs maximale et moyenne du nombre de points de douleurs par séances étaient de $15,5 \pm 7,7$ et de $4,6 \pm 2,5$ u.a./s, respectivement.

Code	Douleurs (u.a./s)			
	Maximum	Minimum	Moyenne	Écart-type
J1	19	0	2,6	3,2
J2	9	0,5	2,4	1,7
J3	11	2	5,0	2,6
J4	23	0	4,9	5,0
J5	6	0	0,4	1,2
J6	10	0,7	3,4	1,9
Moyenne	13,0	0,5	3,1	2,6
Écart-type	6,5	0,8	1,7	1,4

Tableau 12 : Douleurs perçues par séance maximum et moyenne des douleurs perçues par séance

5- Hebdomadaire

Les données sont réparties suivant les trois grandes périodes d'entraînement de l'année : la période de préparation (PP), de compétition 1 (PC1) et de compétition 2 (PC2). Une trêve d'une semaine a été réalisée en semaine 51.

5.1- CHARGE

Les pourcentages sont exprimés au regard de la valeur maximale annuelle, atteinte en semaine 2 ou 3 de la PP. La valeur moyenne des CE moyennes des PC1 et PC2 représente 51 et 53 % de la valeur maximale atteinte en PP, respectivement. La moyenne pour les valeurs maximales de la CE hebdomadaire est de 8118 ± 314 u.a. Les variations de la CE moyenne entre la PC1 et la PC2 sont d'environ -2 % (-100 u.a.).

Code	Préparation (13/09/12-07/10/12)				Compétition 1 (08/10/12-16/12/12)					
	max.	min.	σ	moy.	max.	%	min.	σ	moy.	%
J1	8270	2760	1895	5387	5430	66 %	2735	766	4266	52 %
J2	7985	1910	1890	4412	5585	70 %	3060	823	4505	56 %
J3	7575	2315	2122	4491	3960	52 %	2640	408	3239	43 %
J4	8470	2175	2318	4774	4792	57 %	2985	531	3951	47 %
J5	8305	1150	2109	4062	5203	63 %	3410	575	4344	52 %
J6	8105	2515	2120	4578	5915	73 %	3215	958	4770	59 %
Moyenne	8118	2138	2076	4617	5148	63 %	3008	677	4179	51 %
Écart-type	315	564	162	444	693	8 %	289	206	534	6 %

Tableau 13 : Charge d'entraînement des périodes de préparation et de compétition 1. % : pourcentage du maximum de la période de préparation

Code	Compétition 2 (23/12/12-24/03/13)					Différence C1-C2			
	max.	%	min.	σ	moy.	%	max.	min.	moy.
J1	6235	75 %	3180	792	4845	59 %	-805	-445	-579
J2	5145	64 %	2640	775	3878	49 %	440	420	627
J3	4365	58 %	1665	728	3524	47 %	-405	975	-285
J4	6400	76 %	2525	1253	4718	56 %	-1608	460	-767
J5	5925	71 %	2410	914	3581	43 %	-722	1000	763
J6	7055	87 %	3480	985	5130	63 %	-1140	-265	-360
Moyenne	5854,2	72 %	2650	908	4279	1	-707	358	-100
Écart-type	960,3	10 %	635	194	701	0	695	607	640

Tableau 14 : Charge d'entraînement de la PC2. % : pourcentage du maximum de la période de préparation

5.2- VOLUME

La moyenne pour les valeurs maximales de durée hebdomadaire est de 25,1±1,1 heure. La variation de volume moyen entre la PC1 et la PC2 est de 0,8 heure.

Code	Préparation 13/09/12-07/10/12				Compétition 1 08/10/12-16/12/12				Compétition 2 23/12/12-24/03/13			
	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.
J1	25,0	8,4	6,0	15,8	16,3	10,35	1,7	13,1	16,2	8	2,1	13,7
J2	24,5	5,1	6,3	13,5	16,1	10,05	2,2	14,0	15,3	7	2,4	12,8
J3	26,3	8,6	6,2	16,5	17,3	12,15	1,5	15,2	16,1	7	2,4	13,7
J4	25,0	8,6	5,8	16,1	17,3	13,1	1,3	15,1	16,2	7	2,5	13,0
J5	23,4	3,5	5,8	13,3	16,5	11,25	1,6	14,5	21,6	9	3,1	13,7
J6	26,3	8,6	6,7	15,1	16,1	12,2	1,4	13,4	16,0	7	2,5	13,6
Moyenne	25,1	7,1	6,1	15,1	16,6	11,5	1,6	14,2	16,9	7,5	2,5	13,4
Écart-type	1,1	2,2	0,3	1,4	0,6	1,2	0,3	0,9	2,3	0,8	0,3	0,4

Tableau 15 : Volume hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition

Le volume moyen des PC1 et PC2 représente 51 et 52 % du volume maximum atteint en PP.

5.3- INTENSITE

La moyenne pour les valeurs maximales de l'intensité d'entraînement hebdomadaire est de 6,3±0,9 u.a. La moyenne et les valeurs les plus hautes sont obtenues en PC2.

Code	Préparation 13/09/12-07/10/12				Compétition 1 08/10/12-16/12/12				Compétition 2 23/12/12-24/03/13			
	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.
J1	7,00	4,4	0,8	5,6	6,0	4,4	0,5	5,2	7,0	5,0	0,6	5,7
J2	7,00	4,3	0,9	5,4	5,4	4,8	0,2	5,1	6,3	4,0	0,6	4,9
J3	5,10	3,0	0,7	4,2	3,6	2,9	0,2	3,3	4,3	3,4	0,3	3,9
J4	5,80	3,9	0,7	4,7	4,7	3,6	0,4	4,2	7,1	3,7	1,0	5,6
J5	5,60	4,1	0,5	4,7	5,1	4,4	0,2	4,8	4,7	3,4	0,4	4,1
J6	7,25	3,9	1,1	5,0	7,1	4,3	1,1	6,0	8,3	5,3	0,8	6,4
Moyenne	6,3	3,9	0,8	4,9	5,3	4,1	0,5	4,8	6,3	4,1	0,6	5,1
Écart-type	0,9	0,5	0,2	0,5	1,2	0,7	0,4	1,0	1,5	0,8	0,3	1,0

Tableau 16 : Intensité hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition

5.4- INTENSITE MAXIMALE

La moyenne pour les valeurs maximales de l'intensité maximale d'entraînement hebdomadaire est de $5,8 \pm 1,2$ u.a. La moyenne et les valeurs les plus hautes sont obtenues en PC2.

Code	Préparation 13/09/12-07/10/12				Compétition 1 08/10/12-16/12/12				Compétition 2 23/12/12-24/03/13			
	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.
J1	8,4	5,6	0,9	7,0	7,3	5,1	0,8	6,0	9,8	5,4	1,3	7,2
J2	9,5	6,3	1,1	7,5	7,6	6,1	0,5	7,0	9,3	5,3	1,1	6,3
J3	8,1	3,2	1,7	5,9	4,3	3,0	0,4	3,4	5,3	3,5	0,5	4,3
J4	4,4	2,5	0,7	3,2	3,4	2,0	0,4	2,5	6,7	3,1	1,0	4,6
J5	6,9	0,0	3,2	3,8	6,6	5,8	0,3	6,2	6,3	5,1	0,4	5,5
J6	7,3	3,8	1,3	5,6	7,6	3,4	1,5	6,2	9,0	5,6	0,8	7,2
Moyenne	7,4	3,6	1,5	5,5	6,1	4,2	0,6	5,2	7,7	4,7	0,8	5,8
Écart-type	1,8	2,3	0,9	1,7	1,8	1,7	0,5	1,8	1,9	1,1	0,4	1,2

Tableau 17 : Intensité maximale hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition

5.5- MAITRISE TECHNIQUE/TACTIQUE

La moyenne pour les valeurs maximales de maîtrise technique/tactique hebdomadaire est de $4,3 \pm 1,1$ u.a. La moyenne et les valeurs les plus hautes sont obtenues en PC2.

Code	Préparation 13/09/12-07/10/12				Compétition 1 08/10/12-16/12/12				Compétition 2 23/12/12-24/03/13			
	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.
J1	5,3	3,0	0,7	3,6	3,3	2,3	0,3	2,7	4,4	1,9	0,7	2,9
J2	5,8	4,3	0,5	5,1	5,8	4,3	0,6	5,1	6,0	4,1	0,6	4,9
J3	4,7	2,9	0,6	3,6	4,8	3,5	0,4	4,2	5,7	4,0	0,5	4,7
J4	5,8	4,0	0,6	4,7	6,8	4,3	0,8	5,1	6,9	4,3	0,7	5,6
J5	4,1	2,3	0,6	3,2	4,1	2,5	0,4	3,4	3,6	2,7	0,3	3,1
J6	7,7	2,3	1,8	4,6	5,3	3,0	0,8	4,0	5,4	4,0	0,4	4,7
Moyenne	5,5	3,1	0,8	4,1	5,0	3,3	0,6	4,1	5,3	3,5	0,6	4,3
Écart-type	1,2	0,9	0,5	0,8	1,2	0,9	0,2	1,0	1,2	1,0	0,2	1,1

Tableau 18 : Maîtrise technique/tactique hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition

5.6- ENDORMISSEMENT

La moyenne pour les valeurs maximales de l'endormissement hebdomadaire est de $2,7 \pm 1,2$ u.a. La moyenne et les valeurs les plus hautes sont obtenues en PC2.

Code	Préparation 13/09/12-07/10/12				Compétition 1 08/10/12-16/12/12				Compétition 2 23/12/12-24/03/13			
	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.
J1	3,8	0,4	1,2	1,4	1,5	0,4	0,3	0,8	1,8	0,7	0,4	1,2
J2	3,5	1,5	0,6	2,2	3,0	1,6	0,5	2,2	3,4	1,1	0,7	2,1
J3	4,3	1,1	1,0	2,0	2,3	1,4	0,4	1,8	3,0	1,6	0,3	2,3
J4	6,3	0,9	1,7	2,4	2,8	0,9	0,7	1,6	4,4	0,7	1,0	2,2
J5	4,2	0,0	1,7	2,0	4,1	2,0	0,6	3,1	4,6	2,5	0,7	3,7
J6	6,0	0,9	1,6	3,0	6,0	2,0	1,2	3,9	5,4	3,0	0,7	4,6
Moyenne	4,7	0,8	1,3	2,2	3,3	1,4	0,6	2,2	3,8	1,6	0,6	2,7
Écart-type	1,2	0,5	0,5	0,5	1,6	0,6	0,3	1,1	1,3	1,0	0,2	1,2

Tableau 19 : Endormissement hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition

5.7- SOMMEIL

La moyenne pour les valeurs maximales du sommeil hebdomadaire est de $2,4 \pm 0,9$ u.a. La moyenne et les valeurs les plus hautes sont obtenues en PC2.

Code	Préparation 13/09/12-07/10/12				Compétition 1 08/10/12-16/12/12				Compétition 2 23/12/12-24/03/13			
	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.
J1	2,0	0,6	0,6	1,3	2,0	0,4	0,5	1,1	1,5	0,8	0,3	1,1
J2	3,3	1,5	0,5	2,4	3,3	1,8	0,5	2,5	3,6	1,6	0,6	2,3
J3	2,8	0,9	0,5	1,7	2,9	1,3	0,5	1,8	2,9	1,4	0,4	2,2
J4	6,3	0,9	1,7	2,3	2,6	0,9	0,6	1,6	3,8	1,0	0,9	2,2
J5	5,2	3,2	0,7	3,9	5,4	3,0	0,7	3,6	4,7	2,4	0,6	3,7
J6	3,4	0,7	1,0	2,1	5,0	3,1	0,7	4,0	4,0	2,1	0,6	3,1
Moyenne	3,8	1,3	0,8	2,3	3,5	1,8	0,6	2,4	3,4	1,5	0,6	2,4
Écart-type	1,6	1,0	0,5	0,9	1,4	1,1	0,1	1,2	1,1	0,6	0,2	0,9

Tableau 20 : Sommeil hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition

5.8- ÉTAT D'ESPRIT

La moyenne pour les valeurs maximales de l'état d'esprit hebdomadaire est de $3,2 \pm 0,6$ u.a. La moyenne et les valeurs les plus hautes sont obtenues en PC2.

Code	Préparation 13/09/12-07/10/12				Compétition 1 08/10/12-16/12/12				Compétition 2 23/12/12-24/03/13			
	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.
J1	3,5	1,0	0,9	2,3	3,4	2,0	0,4	2,6	4,4	1,5	1,0	3,2
J2	3,8	1,8	0,7	2,6	3,5	2,4	0,3	3,0	4,3	2,4	0,6	3,2
J3	4,0	1,1	0,9	2,3	3,7	1,7	0,6	2,6	4,3	2,0	0,6	3,1
J4	4,3	1,4	1,1	2,7	4,1	2,4	0,6	3,1	4,9	2,3	0,7	3,8
J5	2,5	1,0	0,6	1,6	2,4	1,2	0,4	1,7	3,4	1,4	0,5	2,1
J6	4,9	1,0	1,2	2,8	5,3	2,4	1,0	4,0	4,3	2,4	0,6	3,7
Moyenne	3,8	1,2	0,9	2,4	3,7	2,0	0,5	2,8	4,3	2,0	0,7	3,2
Écart-type	0,8	0,3	0,3	0,4	0,9	0,5	0,2	0,7	0,5	0,4	0,2	0,6

Tableau 21 : État d'esprit hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition

5.9- FATIGUE

La moyenne pour les valeurs maximales de la fatigue hebdomadaire est de $3,3 \pm 0,6$ u.a. La moyenne et les valeurs les plus hautes sont obtenues en PC2.

Code	Préparation 13/09/12-07/10/12				Compétition 1 08/10/12-16/12/12				Compétition 2 23/12/12-24/03/13			
	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.
J1	4,4	0,0	1,5	2,8	4,3	1,9	0,8	2,9	3,9	1,9	0,7	2,9
J2	3,8	0,0	1,1	2,0	3,1	1,7	0,5	2,6	3,4	2,1	0,4	2,5
J3	4,0	0,0	1,3	2,1	2,9	1,6	0,4	2,2	3,7	2,3	0,4	2,9
J4	5,3	1,9	1,4	3,6	5,2	1,6	1,2	2,7	6,0	2,6	0,9	4,2
J5	4,6	0,0	1,9	2,2	3,7	2,5	0,3	3,1	4,6	2,5	0,5	3,2
J6	5,1	0,0	1,8	3,1	4,3	2,8	0,4	3,6	4,7	3,0	0,5	3,9
Moyenne	4,5	0,3	1,5	2,6	3,9	2,0	0,6	2,8	4,4	2,4	0,6	3,3
Écart-type	0,6	0,8	0,3	0,6	0,9	0,5	0,3	0,5	0,9	0,4	0,2	0,6

Tableau 22 : Fatigue hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition

5.10- DOULEURS (U.A./S)

La moyenne pour les valeurs maximales des douleurs hebdomadaires est de $1,8 \pm 2,1$ u.a./s La moyenne et les valeurs les plus hautes sont obtenues en PC2.

Code	Préparation 13/09/12-07/10/12				Compétition 1 08/10/12-16/12/12				Compétition 2 23/12/12-24/03/13			
	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.
J1	5,8	2,4	1,1	4,1	4,7	0,0	1,3	1,7	8,8	0,0	2,4	2,1
J2	3,0	0,0	1,2	1,2	1,3	0,0	0,6	0,5	1,5	0,0	0,5	0,3
J3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,1	0,0	1,9	1,1
J4	6,4	0,0	2,3	2,9	13,7	0,0	4,1	4,0	11,3	2,0	3,0	5,9
J5	2,0	0,0	0,9	0,7	3,1	0,0	1,0	0,5	1,5	0,0	0,4	0,2
J6	2,5	0,0	0,9	0,7	4,8	0,0	1,5	1,3	3,0	0,0	1,0	1,0
Moyenne	3,3	0,4	1,1	1,6	4,6	0,0	1,4	1,3	5,4	0,3	1,5	1,8
Écart-type	2,4	1,0	0,7	1,6	4,8	0,0	1,4	1,5	4,1	0,8	1,1	2,1

Tableau 23 : Douleurs (u.a./s) hebdomadaires en périodes de préparation et de compétition

5.11- DOULEURS (TOTAL)

La moyenne pour les valeurs maximales des douleurs totales hebdomadaire est de $13,4 \pm 15,8$ u.a. La moyenne et les valeurs les plus hautes sont obtenues en PC2.

Code	Préparation 13/09/12-07/10/12				Compétition 1 08/10/12-16/12/12				Compétition 2 23/12/12-24/03/13			
	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.
J1	58	15	15	32,5	33	0	9,6	12,7	79	0	22	16,7
J2	35	0	12	8,9	13	0	5,5	4,5	12	0	3,9	2,8
J3	0	0	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0	43	0	14	8,2
J4	51	0	17	22,6	123	0	37	36,2	90	7	24	43,7
J5	17	0	7,1	5,6	22	0	7,1	3,4	12	0	3,3	1,2
J6	20	0	7,1	5,6	38	0	12	9,6	24	0	8,3	7,9
Moyenne	30,2	2,5	9,7	12,5	38,2	0,0	12	11,1	43,3	1,2	12	13,4
Écart-type	22,0	6,1	6,3	12,4	43,8	0,0	13	13,1	34,0	2,9	8,9	15,8

Tableau 24 : Douleurs totales hebdomadaires en périodes de préparation et de compétition

5.12- SEANCES

La moyenne le nombre de séances hebdomadaires est de $7,7 \pm 0,5$, $8,6 \pm 0,6$ et $7,6 \pm 0,3$ séances pour les PP, PC1 et PC2, respectivement. La moyenne et les valeurs les plus hautes sont obtenues en PC1.

Code	Préparation 13/09/12-07/10/12				Compétition 1 08/10/12-16/12/12				Compétition 2 23/12/12-24/03/13			
	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.	max.	min.	σ	moy.
J1	13	4	2,8	7,9	10	6	1,1	7,9	10	4	1,6	7,8
J2	13	2	3,5	7,0	10	6	1,4	8,4	9	3	1,7	7,2
J3	14	4	3,0	8,4	11	7	1,1	9,2	9	3	1,6	7,7
J4	13	4	2,7	8,0	11	8	0,9	9,2	9	3	1,7	7,3
J5	10	4	2,1	7,4	10	7	1,2	8,9	10	5	1,5	8,0
J6	14	4	3,3	7,6	10	7	1,1	8,0	9	3	1,7	7,6
Moyenne	12,8	3,7	2,9	7,7	10,3	6,8	1,1	8,6	9,3	3,5	1,6	7,6
Écart-type	1,5	0,8	0,5	0,5	0,5	0,8	0,2	0,6	0,5	0,8	0,1	0,3

Tableau 25 : Nombre hebdomadaire de séances en périodes de préparation et de compétition

5.13- VALEURS MOYENNES PAR SEANCE

Excepté l'intensité maximale, aucune autre valeur ne dépasse la valeur moyenne de 5. La valeur moyenne du nombre de séances est de 8 séances. La valeur moyenne du nombre de jours de repos est de $2 \pm 0,2$.

Code	Intensité max. (u.a./s.)	Maît. techn./tact (u.a./s.)	Endormi ssement (u.a./s.)	Sommeil (u.a./s.)	État d'esprit (u.a./s.)	Fatigue (u.a./s.)	Douleurs (u.a./s.)	Jours repos	Nombre Séances
J1	6,6	2,8	1,1	1,1	3,0	2,9	1,9	2,1	7,9
J2	6,6	5,0	2,1	2,3	3,1	2,6	0,4	1,9	7,7
J3	3,9	4,5	2,1	2,0	2,9	2,6	0,6	2,0	8,4
J4	3,7	5,4	1,9	1,9	3,5	3,5	5,1	2,2	8,1
J5	5,8	3,3	3,4	3,6	2,0	3,2	0,3	1,7	8,4
J6	6,8	4,4	4,3	3,5	3,8	3,8	1,1	2,0	7,8
Moyenne	5,6	4,2	2,5	2,4	3,0	3,1	1,6	2,0	8,0
Écart-type	1,4	1,0	1,2	1,0	0,6	0,5	1,8	0,2	0,3

Tableau 26 : Marqueurs, valeur moyenne par séance

LISTE DES TABLEAUX

Page 60	Tableau 1 : Zones de fréquence cardiaque (Edwards S., 1993)
Page 61	Tableau 2 : Facteurs de pondération pour chaque zone d'intensité d'entraînement (Wood et coll., 2005). FC : fréquence cardiaque. bpm : battements par minute
Page 63	Tableau 3 : Facteurs de pondération pour chaque zone d'intensité d'entraînement (Mujika et coll., 1996). [La] : lactatémie
Page 64	Tableau 4 : Zones d'intensité (Lucia et coll., 2003)
Page 71	Tableau 5 : Échelle de Foster et coll. (2001)
Page 74	Tableau 6 : Échelle d'estimation de l'intensité de l'exercice (ESIE), Grappe et coll. 1999
Page 75	Tableau 7 : Échelle de sensations (Grappe et coll. 1999)
Page 75	Tableau 8 : Échelle d'humeur (Grappe et coll. 1999)
Page 76	Tableau 9 : Échelle CR-10 (Borg G., 1987)
Page 83	Tableau 10 : Description des études basées sur le modèle de Banister et coll. (1975)
Page 103	Tableau 11 : Capacité de performance quotidienne cumulée d'une période de neuf jours (trois jours de 500 u.a., suivi d'un jour de repos et de cinq jours de 500 u.a.).
Page 114	Tableau 12 : Baisse de la CE de type linéaire et exponentielle en u.a. Conséquence sur la CPQ. L'écart de performance est de 2,4 % à la faveur de la baisse exponentielle de la CE.
Page 131	Tableau 13 : Caractéristiques morphologiques des joueuses
Page 139	Tableau 14 : Test de Contremouvement Jump (CMJ) sans élan bras libres
Page 140	Tableau 15 : Test de Contremouvement Jump (CMJ) avec élan bras libres, face au filet
Page 140	Tableau 16 : Paramètres de la CPQ modélisée durant la période d'étude de neuf mois et coefficient de Kendall τ pour les tests de CMJ sans élan et avec élan. (J : Joueuse, âge, paramètre d'amortissement θ , période T de la CPQ, tau de Kendall τ et valeur p)
Page 141	Tableau 17 : Paramètres du modèle de Banister (Morton et coll., 1990). (τ_a and τ_f , constantes de temps de fitness et de fatigue. k_a et k_f , facteurs pondérateurs de fitness et de fatigue)
Page 141	Tableau 18 : Qualité d'ajustement du modèle de Banister et de la modélisation de la CPQ avec le test de CMJ. (R^2 : coefficient de détermination ; RMSE : racine carrée de l'erreur quadratique moyenne ; W : test de Shapiro-Wilk et valeur p). Le paramètre d'amortissement θ et la période T étaient positivement corrélés avec l'âge ($\rho=0,81$, $p<0,05$ and $\rho=0,86$, $p<0,02$ respectivement).
Page 145	Tableau 19 : Analyse en Composantes Principales, Variance expliquée (ACP Var.), Indice (Kaiser - Mayer - Olkin (ACP KMO) ; Classification Hiérarchique Ascendante, Variabilité expliquée (CAH Cluster Var.)
Page 145	Tableau 20 : Rotation VARIMAX, Répartition de la variabilité expliquée pour chaque axe.
Page 146	Tableau 21 : Rotation Varimax, Corrélations des variables avec les axes

Page 149	Tableau 22 : Classification Hiérarchique Ascendante, Corrélations des variables avec les clusters.
Page 149	Tableau 23 : Classification Hiérarchique Ascendante, Résumé des clusters. Cluster 1 : cluster Entraînement. Cluster 2 : cluster Contexte. Cluster 3 : cluster Récupération.
Page 150	Tableau 24 : Classification Hiérarchique Ascendante, Indicateur ($1-R^2$ ratio)
Page 151	Tableau 25 : Classification Hiérarchique Ascendante, corrélations entre les clusters
Page 152	Tableau 26 : Classification Hiérarchique Ascendante, corrélations entre la Capacité de performance et les clusters
Page 152	Tableau 27 : Classification Hiérarchique Ascendante, corrélations entre le niveau de douleurs perçues et les clusters.
Page 153	Tableau 28 : Distribution hebdomadaire de la CE par périodes de préparation et de compétitions
Page 153	Tableau 29 : Charge d'entraînement moyenne quotidienne par jour de la semaine
Page 155	Tableau 30 : Distribution hebdomadaire du volume par périodes de préparation et de compétitions
Page 157	Tableau 31 : Distribution hebdomadaire de l'intensité moyenne (total quotidien) par périodes de préparation et de compétitions
Page 157	Tableau 32 : Distribution hebdomadaire de l'intensité moyenne (moyenne quotidienne) par périodes de préparation et de compétitions
Page 159	Tableau 33 : Localisation des douleurs perçues
Page 260	Tableau 1 : Nombre de jours d'entraînement, de jours de repos, de jours avec douleurs
Page 260	Tableau 2 : Charge d'entraînement maximum et charge d'entraînement moyenne (valeurs quotidiennes)
Page 261	Tableau 3 : Durée maximum et moyenne de durée des entraînements (valeurs quotidiennes)
Page 261	Tableau 4 : Intensité moyenne maximum et moyenne de l'intensité moyenne (valeurs quotidiennes)
Page 262	Tableau 5 : Intensité maximale perçue maximum et moyenne de l'intensité maximale perçue (valeurs quotidiennes)
Page 262	Tableau 6 : Maîtrise technique et tactique perçue maximum et moyenne de la maîtrise technique et tactique perçue (valeurs quotidiennes)
Page 263	Tableau 7 : Fatigue perçue maximum et moyenne de la fatigue perçue (valeurs quotidiennes)
Page 263	Tableau 8 : Endormissement perçu maximum et moyenne de l'endormissement perçu (valeurs quotidiennes)
Page 264	Tableau 9 : Sommeil perçu maximum et moyenne du sommeil perçu (valeurs quotidiennes)
Page 264	Tableau 10 : État d'esprit perçu maximum et moyenne de l'état d'esprit perçu (valeurs quotidiennes)
Page 265	Tableau 11 : Total de douleurs perçues maximum et moyenne du total de douleurs perçues (valeurs quotidiennes)
Page 265	Tableau 12 : Douleurs perçues par séance maximum et moyenne des douleurs perçues par séance
Page 266	Tableau 13 : Charge d'entraînement des périodes de préparation et de compétition 1
Page 266	Tableau 14 : Charge d'entraînement de la PC2
Page 267	Tableau 15 : Volume hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition

Page 267	Tableau 16 : Intensité hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition
Page 268	Tableau 17 : Intensité maximale hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition
Page 268	Tableau 18 : Maîtrise technique/tactique hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition
Page 269	Tableau 19 : Endormissement hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition
Page 269	Tableau 20 : Sommeil hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition
Page 270	Tableau 21 : État d'esprit hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition
Page 270	Tableau 22 : Fatigue hebdomadaire en périodes de préparation et de compétition
Page 271	Tableau 23 : Douleurs (u.a./s) hebdomadaires en périodes de préparation et de compétition
Page 271	Tableau 24 : Douleurs totales hebdomadaires en périodes de préparation et de compétition
Page 272	Tableau 25 : Nombre hebdomadaire de séances en périodes de préparation et de compétition
Page 272	Tableau 26 : Marqueurs, valeur moyenne par séance

LISTE DES FIGURES

- Page 26 Figure 1 : Approche cybernétique des effets de l'entraînement. La performance est dépendante de l'entraînement, d'influences externes de l'environnement et de régulations internes (+/- : rétroactions positives ou négatives).
- Page 30 Figure 2 : Modèle à deux composantes de Banister et coll. (1975). $w(t)$ est l'entraînement exprimé en unités arbitraires (U.A), $p(t)$ est la performance et + /- représente l'influence négative ou positive de la fatigue.
- Page 31 Figure 3 : Variation de la performance selon le modèle de Banister et coll. pour une unique CE de 100 u.a.
- Page 36 Figure 4 : Variation de la performance selon le modèle de Morton et coll. (1990) pour des CE continues de 1 u.a., avec $k_1=1$ et $k_2=2$
- Page 37 Figure 5 : Variation de la performance selon le modèle de Morton et coll. (1990) (avec $k_1=1$ et $k_2=2$) pour des CE de 1 u.a. avec deux jours de repos à la 11e et 12e journée.
- Page 44 Figures 6a, b, c : Variation du niveau de performance pour un entraînement initial de 100 u.a. ($k_1=1$, $k_2=2$, $\tau_1=45$ et $\tau_2=15$) (6a) ; patterns correspondant aux deux fonctions du modèle, FN et PF (6b) ; patterns des influences de l'entraînement sur la performance, IP et IN (6c). t_n est la durée correspondant à l'égalité des deux fonctions FP et FN. D'après Busso et coll., 1994)
- Page 51 Figure 7 : Structure antagoniste avec surcharge du modèle *PerPot*, Perl J. (2000). Potentiel de stress : traduction libre de Strain potential. Potentiel de réponse : traduction libre de Response potential.
- Page 52 Figure 8 : PerPot : Effets des potentiels DS et DR sur la performance (Perl J., 2000)
- Page 54 Figure 9 : Concepts linéaire (a) et non linéaire (b) de l'adaptation à l'entraînement, Hohmann (2000)
- Page 55 Figure 10 : Perceptron multicouche avec 10 neurones (cercles : neurones, lignes : connexions entre les neurones) - Hohmann et coll., 2000
- Page 101 Figure 11 : Capacité de Performance Quotidienne (CPQ) : charge d'entraînement de 500 u.a. sur une période de 11 jours. La durée est exprimée sur l'axe horizontal en jours. La sinusoïde varie de -500 à 500 u.a. (axe primaire) et l'exponentielle décroît (amortissement θ de 6 u.a) de 1 à 0,15 u.a. (axe secondaire).
- Page 102 Figure 12 : Capacité de Performance Quotidienne (CPQ) pour une charge d'entraînement de 500 u.a. sur une période de 11 jours. La valeur maximale de CPQ est de valeur maximale 130 u.a. au 9e jour, de valeur minimale -325 u.a ; au 4e jour. La durée est exprimée sur l'axe horizontal en jours. La sinusoïde varie de -500 à 500 u.a. (axe primaire) et l'exponentielle décroît (amortissement θ de 6 u.a) de 1 à 0,15 u.a. (axe secondaire).
- Page 103 Figure 13 : Capacité de performance quotidienne cumulée pour une période de trois jours d'entraînement de 500 u.a., suivi d'une journée de repos et de cinq jours d'entraînement de 500 u.a. La valeur minimale est de -855 u.a. le 4e jour et la valeur maximale de 316 u.a. au 15e jour soit 6 jours après le dernier entraînement.
- Page 103 Figure 14 : Capacité de performance quotidienne différée avec pour paramètres : charge d'entraînement=500 u.a., période $T=10$ jours, amortissement $\theta=6$ u.a. La valeur maximale de la capacité de performance quotidienne est obtenue le 8e jour : 148 u.a.
- Page 105 Figure 15 : Capacité de performance quotidienne différée avec pour paramètres : charge d'entraînement=500 u.a., période $T=15$ jours, amortissement $\theta=6$ u.a. La valeur maximale de la capacité de performance quotidienne est obtenue le 10e jour : 81 u.a.
- Page 106 Figure 16 : Capacité de performance quotidienne différée avec pour paramètres : charge d'entraînement=500 u.a., période $T=20$ jours, amortissement $\theta=6$ u.a. La

- valeur maximale de la capacité de performance quotidienne est obtenue le 13e jour : 46 u.a.
- Page 106 Figure 17 : Variations de la capacité de performance quotidienne (CPQ) pour des valeurs de T de 10, 15 et 20 jours pour trois microcycles identiques successifs (100, 200, 300, 500, 300, 100 et 0 u.a.).
- Page 108 Figure 18 : Capacité de performance quotidienne différée avec pour paramètres : charge d'entraînement=500 u.a., période T=10 jours, amortissement $\theta=5$ u.a. La valeur maximale de la capacité de performance quotidienne est obtenue le 8e jour : 117 u.a.
- Page 108 Figure 19 : Capacité de performance quotidienne différée avec pour paramètres : charge d'entraînement=500 u.a., période T=10 jours, amortissement $\theta=10$ u.a. La valeur maximale de la capacité de performance quotidienne est obtenue le 8e jour : 236 u.a.
- Page 109 Figure 20 : Capacité de performance quotidienne différée avec pour paramètres : charge d'entraînement=500 u.a., période T=10 jours, amortissement $\theta=15$ u.a. La valeur maximale de la capacité de performance quotidienne est obtenue le 8e jour : 298 u.a.
- Page 109 Figure 21 : Variations de la capacité de performance quotidienne (CPQ) pour des valeurs de θ de 5, 10 et 15 u. a. pour trois microcycles identiques successifs (100, 200, 300, 500, 300, 100 et 0 u.a.). T=10 jours.
- Page 110 Figure 22 : Effets de l'organisation d'une même charge d'entraînement (CE) sur la variation de capacité de performance (CPQ) pour une période de trois semaines. Les CE sont inversées en début de semaine (lundi au mercredi) et identiques en fin de semaine (jeudi au dimanche). J6, J13 et J20 : matchs.
- Page 111 Figure 23 : Effets de l'organisation d'une même charge d'entraînement (CE) sur la variation de performance calculée avec le modèle de Banister (1975) pour une période de trois semaines. Les CE sont inversées en début de semaine (lundi au mercredi) et identiques en fin de semaine (jeudi au dimanche). J6, J13 et J20 : matchs.
- Page 112 Figure 24 : Effets de l'organisation d'une même charge d'entraînement (CE) sur la variation de capacité de performance (CPQ) pour une période de trois semaines. Les CE sont inversées en début de semaine (lundi et mardi) et identiques en fin de semaine (mercredi à dimanche). J7, J14 et J21 : matchs.
- Page 113 Figure 25 : Effets du positionnement hebdomadaire des jours de repos sur la variation de capacité de performance (CPQ) pour une période de trois semaines. Les CE hebdomadaires sont 3600 u.a. Les CE sont de 900 u.a. les lundis, mardis, mercredis et samedis (CE 1) et les mardis, mercredis, jeudis et samedis (CE 2). Les autres jours sont des jours de repos.
- Page 114 Figure 26 : Effets de deux types de baisse de la CE sur la variation de capacité de performance (CPQ). La baisse exponentielle de la CE provoque une amélioration de 2,4 % supérieure à celle de la baisse linéaire.
- Page 119 Figure 27 : TrainingLoad Pro - Formulaire d'identification
- Page 120 Figure 28 : TrainingLoad Pro - Formulaire de saisie - Placements initiaux des curseurs
- Page 122 Figure 29 : TrainingLoad Pro - Formulaire de saisie - Exemple d'une saisie
- Page 125 Figure 30 : TrainingLoad Pro - Description des douleurs
- Page 126 Figure 31 : TrainingLoad Pro - Graphiques
- Page 127 Figure 32 : TrainingLoad Pro - Graphiques - État de forme et charge d'entraînement quotidienne
- Page 128 Figure 33 : TrainingLoad Pro - Tableaux
- Page 135 Figure 34 : OptoJump Next
- Page 136 Figure 35 : CMJ avec élan face au filet
- Page 142 Figure 36 : Tests de contre-mouvement jump sans élan, performance selon le modèle

- de Banister (1975) et capacité de performance quotidienne (CPQ) modélisée de la joueuse J1 sur une période de neuf mois. Les valeurs des performances modélisées sont normalisées.
- Page 142 Figure 37 : Tests de contre-mouvement jump sans élan, performance selon le modèle de Banister (1975) et capacité de performance quotidienne (CPQ) modélisée de la joueuse J2 sur une période de neuf mois. Les valeurs des performances modélisées sont normalisées.
- Page 143 Figure 38 : Tests de contre-mouvement jump sans élan, performance selon le modèle de Banister (1975) et capacité de performance quotidienne (CPQ) modélisée de la joueuse J3 sur une période de neuf mois. Les valeurs des performances modélisées sont normalisées.
- Page 143 Figure 39 : Tests de contre-mouvement jump sans élan, performance selon le modèle de Banister (1975) et capacité de performance quotidienne (CPQ) modélisée de la joueuse J4 sur une période de neuf mois. Les valeurs des performances modélisées sont normalisées.
- Page 144 Figure 40 : Tests de contre-mouvement jump sans élan, performance selon le modèle de Banister (1975) et capacité de performance quotidienne (CPQ) modélisée de la joueuse J5 sur une période de neuf mois. Les valeurs des performances modélisées sont normalisées.
- Page 144 Figure 41 : Tests de contre-mouvement jump sans élan, performance selon le modèle de Banister (1975) et capacité de performance quotidienne (CPQ) modélisée de la joueuse J5 sur une période de neuf mois. Les valeurs des performances modélisées sont normalisées.
- Page 147 Figure 42 : Cercle des corrélations de la joueuse J4. La CE et la CPQ sont fortement corrélés négativement (axe 3). La maîtrise et l'humeur sont fortement corrélées positivement (axe 1)
- Page 148 Figure 43 : Cercle des corrélations de la joueuse J4. La maîtrise et l'humeur sont fortement corrélées (axe 2). Le sommeil et l'endormissement sont fortement corrélés (axe 3).
- Page 148 Figure 44 : Cercle des corrélations de la joueuse J4. La CE, ses paramètres et la CPQ sont fortement corrélés (axe 2). Le sommeil et l'endormissement sont fortement corrélés (axe 1).
- Page 150 Figure 45 : Dendrogramme avec les trois clusters de la joueuse J4.
- Page 154 Figure 46 : Profil hebdomadaire de la CE en période de compétition 1
- Page 154 Figure 47 : Profil hebdomadaire de la CE en période de compétition 2
- Page 155 Figure 48 : Variations de l'intensité et du volume moyens hebdomadaires
- Page 156 Figure 49 : Profil hebdomadaire du volume en période de compétition 1
- Page 156 Figure 50 : Profil hebdomadaire du volume en période de compétition 2
- Page 158 Figure 51 : Profil hebdomadaire de l'intensité moyenne en période de compétition 1
- Page 158 Figure 52 : Profil hebdomadaire de l'intensité moyenne en période de compétition 2
- Page 160 Figure 53 : Localisation des douleurs

ABSTRACT

Modelling the training effects on performance allow to better conceptualize athlete adaptations to training to help coaches faced with many uncertainties, as possible alternatives to high level performance, overreaching, overtraining and injury. The daily training load (TL) quantification is then the first step of the training periodization. Our literature review shows that these affects are non final statement of interactions between exogenous and endogenous factors (Banister et coll., 1975, Busso et coll., 1990, Morton et coll., 1990). The concept of TL involves an effect level resulting in the body in the form of functional responses that have a certain intensity and a certain time. It involves follow several perceptual markers daily.

The advances made in the area of computer and communication technologies now offer new opportunities for designing an ergonomic computer system to collect, process, and visualize large amounts of data, but also provides an alternative modelling of the training effects. Inspired by the general mechanisms regulating homeostasis and chronobiology, we postulated that the performance capacity of each training day can be modeled by a wave whose amplitude, after reaching a maximum, gradually decrease to tend to return to its initial level during the following days (damped harmonic oscillation).

Our results allow us to discuss the possibilities of such a system on an analysis of the coaches practices in terms of training load management at different times of the plan. Despite the small number of subjects (six players), they show that the use of the concept of damped harmonic oscillation model for the cumulative and delayed effects of training appears promising. But before applying it to a wide range of subjects and practices (rehabilitation, physical activity of older person), further investagtion is needed.

Key words

Training load, Performance capacity,
Modelling, Fitness, Fatigue,
Communication technologies

RÉSUMÉ

La modélisation des effets de l'entraînement sur la performance permet de mieux conceptualiser les adaptations du sportif pour aider les entraîneurs confrontés à de multiples incertitudes, avec comme alternatives possibles à une performance de haut niveau, le surmenage, le surentraînement et la blessure. La quantification quotidienne de la CE est alors la première étape de la périodisation de l'entraînement. Notre revue de la littérature montre que ces effets sont un état non définitif des interactions entre différents facteurs exogènes et endogènes (Banister et coll., 1975, Busso et coll., 1990, Morton et coll., 1990). La notion de charge d'entraînement implique un niveau d'effet se traduisant dans l'organisme sous la forme de réactions fonctionnelles qui ont une certaine intensité et une certaine durée. Cela implique de suivre quotidiennement plusieurs marqueurs perceptifs.

Les progrès de l'informatique et des objets communicants nous ont permis de concevoir un système informatique ergonomique afin de récupérer, de traiter, et de visualiser un grand volume de données, mais aussi de proposer une modélisation alternative des effets de l'entraînement. Nous inspirant des mécanismes généraux de régulation de l'homéostasie et de la chronobiologie, nous avons postulé que la capacité de performance quotidienne peut être modélisée par une onde dont l'amplitude, après avoir atteint un maximum, diminue graduellement pour tendre à retourner à son niveau initial durant les jours qui suivent (oscillation harmonique amortie).

Nos résultats permettent de discuter des possibilités d'un tel système sur l'analyse des pratiques des entraîneurs en termes de gestion de la charge d'entraînement aux différentes périodes de l'année. Malgré le faible nombre de sujets (six joueuses), ils montrent que l'utilisation du concept d'oscillation harmonique amortie pour modéliser les effets cumulés et différés de l'entraînement semble prometteuse. Mais avant de l'appliquer à de plus vastes types de publics et de pratiques (réathlétisation, suivi de l'activité physique d'un public âgé), de plus amples recherches sont nécessaires.



Mots clés

Charge d'entraînement, Capacité de performance, Modélisation, Aptitude, Fatigue, Nouvelles technologies