

Utilisation de la variabilité de la fréquence cardiaque chez le sportif

La variabilité de la fréquence cardiaque chez le sportif devait initialement offrir la possibilité de prédire la performance et d'optimiser l'entraînement. La mise en place de l'utilisation de cet outil s'est révélée pertinente, mais très complexe.

Dr Martin Buchheit (Préparateur physique handball 1^{re} division, Faculté des Sciences du Sport, Amiens)

> Les attentes du milieu sportif

Dès les années 90, à la suite de quelques premières études prometteuses décrivant les liens entre capacité cardiorespiratoire, charges d'entraînement et variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) (1-4), plusieurs auteurs ont tenté de proposer la VFC comme un outil objectif et non-invasif de suivi de l'entraînement des sportifs (5-7). L'objectif était alors d'évaluer, à partir d'enregistrements ECG ponctuels ou répétés dans le temps, les adaptations neurovégétatives de l'organisme en réponse à l'entraînement. Ceci devait permettre à l'entraîneur et au sportif d'affiner et d'individualiser les programmes d'entraînement et de posséder enfin un indice pronostique de fraîcheur ou de forme physique, capable de prédire la performance, de déceler et d'anticiper un éventuel état de surmenage. Nous verrons que cet outil, qui était à ses débuts autant

excitant que révolutionnaire, se révèle aujourd'hui toujours pertinent et utile, mais, malheureusement, aussi très complexe et difficile à mettre en place chez certains athlètes.

> VFC : les indices à suivre de près

La VFC, également présentée sous les termes de "variabilité sinusale" ou encore "d'arythmie respiratoire", fait référence aux oscillations spontanées du rythme cardiaque (8). Celles-ci sont à mettre en relation d'une part avec l'activité du système nerveux autonome et les influences réciproques des voies sympathiques et parasympathiques qui innervent le myocarde et, d'autre part, avec la respiration, au travers de l'action du générateur central de la ventilation et les influences mécaniques périphériques (9). La VFC est exprimée et quantifiée par différents indices. Les premiers sont

de simples indices statistiques, tels que le SDNN (en msec ; écart type de la série d'intervalles R-R considérée, rendant compte de la variabilité globale) ou le RMSSD (en msec ; écart-type des différences entre deux battements successifs, rendant compte de la composante rapide de variabilité, donc du tonus vagal) (8). Les seconds, plus qualitatifs, sont ceux obtenus grâce à

l'analyse spectrale (transformée rapide de Fourier, FFT) de l'évolution des R-R en fonction du temps. Cette analyse fréquentielle permet de générer un périodogramme (Fig. 1) illustrant la répartition de densité spectrale ($\text{msec}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$) en fonction de la fréquence des oscillations présentes dans le tracé initial. La densité spectrale en hautes fréquences

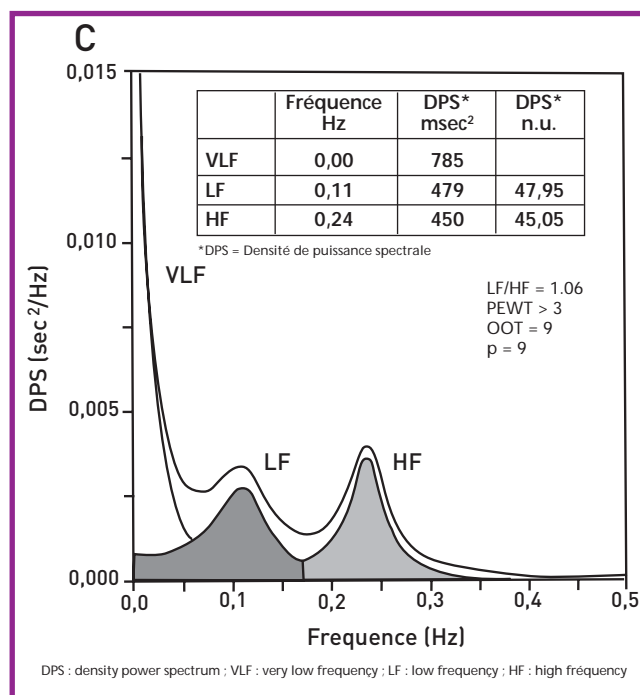


Figure 1 : Périodogramme issu de l'analyse spectrale (8).

(HF entre 0,1 et 0,4 Hz) est utilisée pour quantifier l'activité parasympathique médiée par le phénomène d'arythmie respiratoire. Les basses fréquences (LF entre 0,004 et 0,15 Hz), quant à elles, renvoient à l'activité sympathique, avec, malgré tout, une composante vagale. Le rapport HF/(LF+HF) fait ainsi référence au concept de "balance sympathovagale" (9), en exprimant la part parasympathique de celle-ci. Bien que d'autres méthodes d'analyses soient également utilisées (fractales, ondelettes...), nous nous limiterons à celles-ci car elles concernent encore plus de 90 % des publications actuelles.

> Validité et limites des protocoles d'enregistrements

Les variations de VFC liées au cycle veille/sommeil (10), les perturbations liées au milieu environnemental ou à la respiration (11), mais aussi les modifications aiguës en réponse aux séances d'entraînement isolées (2), sont trop rarement prises en compte dans le milieu sportif ou lors des recherches sur le terrain. Cependant, les conditions et les périodes d'enregistrement revêtent une importance déterminante pour l'utilisation que nous voulons faire de la VFC chez le sportif (8). Avant tout, nous laisserons de côté les enregistrements réa-

lisés lors de l'exercice (12, 13) et ceux réalisés sur des périodes longues allant de 1h à 24 h. Pour les premiers, il est évident que ces conditions ne sont pas aisées à pratiquer en routine. D'autre part, les enregistrements d'effort nécessitent la connaissance des capacités maximales du sujet ($VO_2\text{max}$) ou de certains repères physiologiques (seuils ventilatoires), afin d'ajuster les intensités appropriées pour l'enregistrement des séries de R-R. En effet, au-dessus du seuil ventilatoire, par exemple, il apparaît que la variabilité ne reflète plus l'activité autonome (12), mais que celle-ci est en revanche artificiellement entretenue par des influences mécaniques dues à l'accélération de la ventilation (13). En ce qui concerne les enregistrements de longue durée, certains éléments non maîtrisés, tels que l'activité physique journalière ou encore la qualité de sommeil, viennent confondre les données et limitent ainsi l'estimation de l'activité autonome à partir de la VFC. Ainsi, il apparaît plus cohérent d'avoir recours en routine à des enregistrements de repos, en décubitus dorsal, lors de périodes bien standardisées dont les conditions environnementales sont connues et bien maîtrisées (sur 20 min, dont seules les 5 dernières sont retenues). Etant donné que les enregistrements orthostatiques (ou encore sous forme de "tilt test") ne nous

ont jamais permis de tirer des données pertinentes, nous avons décidé de les abandonner au fil de nos études. A ce compte-là, les enregistrements réalisés au lit, au réveil (14), sont intéressants car ils représentent des conditions environnementales bien reproductibles d'un jour à l'autre. De plus, ils ont l'avantage de placer le sujet dans une situation neutre, en début de journée, à un moment où l'on souhaitera justement connaître son état de forme, de fraîcheur ou encore de récupération. Cependant, il existe un dernier élément qui peut perturber l'analyse de la VFC dans ces conditions : la fréquence respiratoire (11). Le phénomène d'arythmie respiratoire (tachycardie à l'inspiration-bradycardie à l'expiration), qui se mêle aux influences neurovégétatives, concentre la densité de puissance spectrale autour de la fréquence respiratoire (FR). Tant que cette dernière reste strictement supérieure à 9 cycles.min⁻¹ (soit 0,15 Hz), le pic de densité spectrale généré reste situé dans les bornes des HF. Dans ce cas de figure, le tonus parasympathique et la balance sympathovagale peuvent être estimés de manière appropriée. En revanche, chez les sujets sportifs respirant spontanément très lentement, la FR décale le pic respiratoire du spectre vers les LF : l'activité sympathique est surestimée et la variabilité en HF (et l'estimation du tonus vagal) diminue artifi-

ciellement. A part modifier les bornes des bandes de densité spectrale, la parade la plus utilisée consiste à demander aux athlètes de caler leur respiration sur un rythme imposé par un métronome auditif ou visuel (souvent 12 cycles.min⁻¹, soit 0,20 Hz). Bien que cela corrige ce problème lié à la FR, ce contrôle est susceptible d'entraîner un stress, voire un inconfort, pouvant à nouveau confondre les données.

Nous avons récemment montré que la fréquence respiratoire était plus régulière lors du sommeil lent profond que lors des périodes de veille en respiration contrôlée et, surtout, que la FR y était spontanément plus élevée (16 vs 10 cycles.min⁻¹) (15). En effet, celle-ci se trouvait systématiquement dans les bornes HF et ceci, même chez des individus présentant une FR faible lors de la veille. De ce fait, les périodes de sommeil lent profond, qu'il est possible de déceler à la seule observation du tracé R-R au fil de la nuit (Fig. 2), placent à la fois l'individu dans une condition exempte de perturbations environnementales confondantes (bruit, stress...) et dans une situation optimale vis-à-vis du phénomène d'arythmie respiratoire.

Pour conclure, il faut aussi savoir que le niveau de variabilité peut presque varier du simple au double en 24 h, en réponse à un exercice physique isolé (Fig. 3). Cette labi-

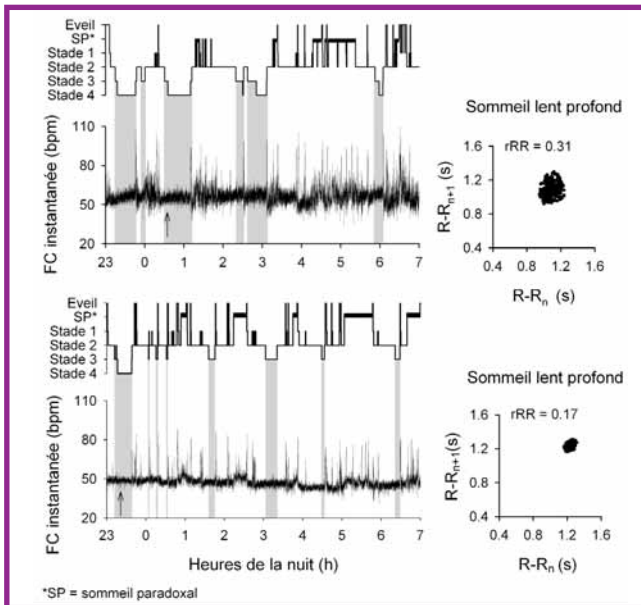


Figure 2 : Evolution de la fréquence cardiaque lors de la nuit chez deux sujets représentatifs. Notez les différences de VFC en fonction des différents stades de sommeil. Les périodes de sommeil lent profond, mises en avant ici par les zones grisées, peuvent être remarquées visuellement sans l'aide de l'hypnogramme à partir, entre autres, de la représentation circulaire du Poincaré plot (15).

lité, dont nous décrivons plus loin l'intérêt, oblige également à hautement standardiser l'activité physique les jours précédents l'enregistrement. En pratique, pour effectuer un enregistrement ponctuel, il est ainsi conseillé d'effectuer les enregistrements une nuit ou un matin faisant suite à 1 ou 2 jours de repos consécutifs et de s'assurer que les activités physiques précédant l'enregistrement aient été complètement "digérées" (restauration de l'homéostasie...). Pour les pratiquants de sports individuels, les enregistrements ne devront donc pas s'effectuer durant les 2 jours suivant la course ou un entraînement intense. En sport collectif par exemple, la nuit du dimanche au

lundi ou le lundi matin constitueront les moments les plus appropriés (dans le cas d'un match le samedi soir et d'une journée de repos le dimanche).

> Où en est-on ?

Les effets de l'activité physique, de l'entraînement aérobie ou encore de la capacité cardiorespiratoire

sur la VFC ont fait l'objet de nombreuses études ces dix dernières années. De manière générale, il a été montré que les athlètes présentaient une variabilité globale et des indices reflétant l'activité parasympathique majorés comparativement à des individus sédentaires et que les sujets entreprenant une activité physique ou s'engageant dans un programme d'entraînement aérobie voyaient leurs indices s'améliorer au fil de la période d'entraînement (1, 4). De même, alors que la baisse de VFC avec l'âge témoigne de la dégradation de la fonction cardioprotective attribuée au tonus vagal, il a été montré qu'un style de vie sportif (17) et que la pratique régulière d'une activité physique d'intensité modérée à intense (18) permettent de ralentir la chute du SDNN et des HF, et participent ainsi à la diminution du risque cardiovasculaire. Ensuite, il a aussi été rapporté en cas de surcharge d'entraînement (6), voire de surentraînement (7), ou simplement de fatigue ou de stress lié aux compétitions (19), que les indices de

variabilité ont tendance à s'écarter des valeurs attendues. Dans la plupart des cas, il s'agit d'une baisse de l'activité parasympathique au profit du tonus sympathique (6, 7), mais dans d'autres cas plus rares, d'une hausse des indices liés à l'activité vagale (5). Enfin, il ne faut pas non plus ignorer le nombre important d'études qui n'ont pas permis d'observer les résultats espérés (1) (absence de différences de VFC après entraînement, aucun effet d'une fatigue importante sur la VFC (20)...), parfois par manque d'un protocole d'enregistrement approprié, parfois aussi simplement, comme nous le verrons, parce que la VFC n'est pas un indicateur si simple à appliquer et à interpréter...

> Utilisation de la VFC dans l'entraînement du sportif

Enregistrements ponctuels

Les enregistrements ponctuels de VFC peuvent être utilisés comme complé-

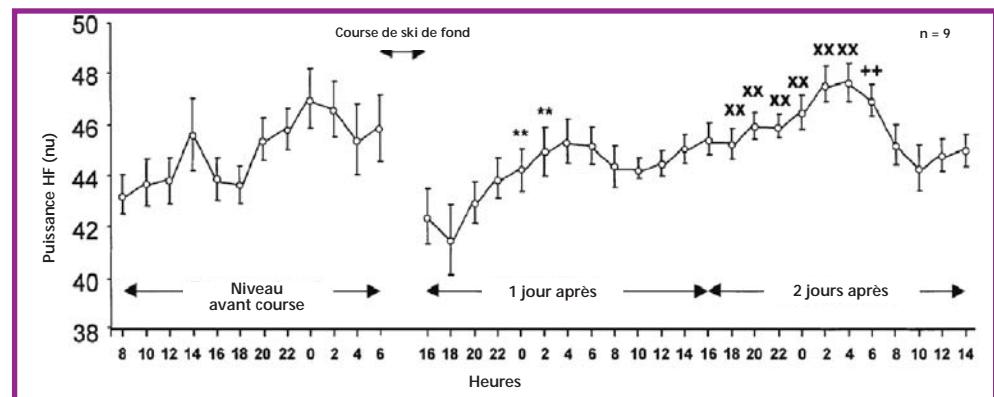


Figure 3 : Evolution de la densité spectrale en HF avant et après une course de ski de fond (75 km) (16).

ment de l'évaluation de la capacité cardiorespiratoire. Les premières données illustrant une association positive entre capacité cardiorespiratoire ($VO_2\max$) et VFC (et plus particulièrement les indices liés à l'activité parasympathique) remontent aux travaux de Kenney en 1985 (3). Depuis, de nombreuses études ont confirmé cette relation positive (1, 4). Cependant, dans toutes ces études, les influences respectives des capacités physiques et fonctionnelles d'une part, ou de l'activité physique (les charges d'entraînement) sur la VFC d'autre part ont été confondues et donc impossibles à dissocier. En effet, dans les études longitudinales, les deux facteurs étaient modifiés en parallèle, les modifications comportementales induisant bien souvent l'amélioration des capacités physiques. Concernant les études transversales, les athlètes entraînés avec de hautes $VO_2\max$ étant souvent comparés à des sédentaires aux faibles capacités cardiorespiratoires, il n'était pas non plus possible de dissocier les effets d'un facteur par rapport à l'autre. Notre dernière étude (21), qui est la première à observer les effets séparés de la capacité cardiorespiratoire et de l'activité physique, montre, par un jeu d'appariement et d'ajustements mathématiques, que la VFC est essentiellement liée aux capacités cardiorespiratoires et très peu aux charges d'entraînement (Fig. 4).

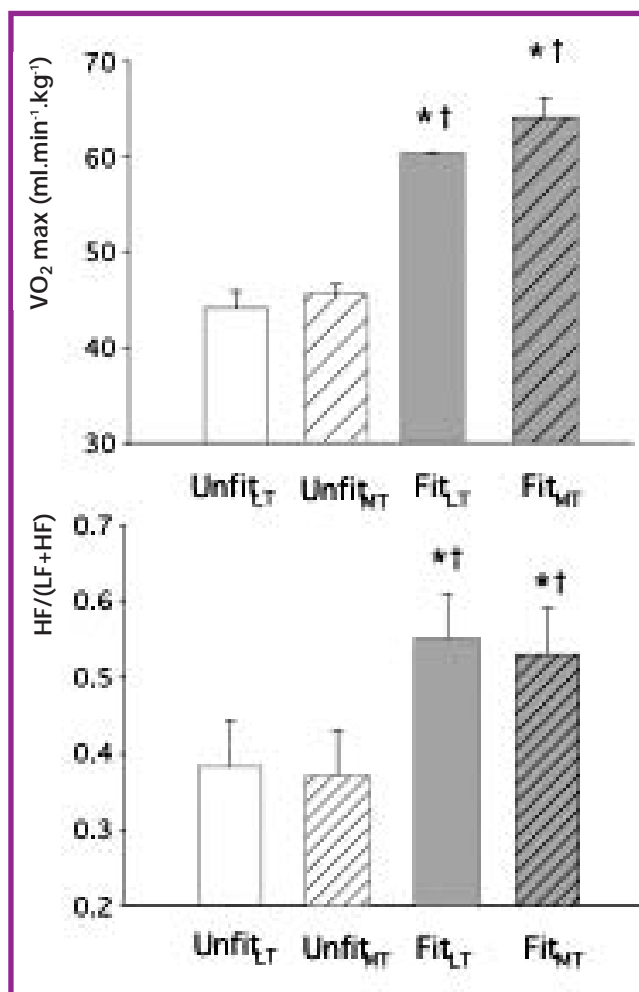


Figure 4 : Indices de l'activité parasympathique en fonction de la capacité cardiorespiratoire (Fit vs. Unfit) et des charges usuelles d'entraînement (LT (charges faibles) vs. MT (charges modérées)) (8).

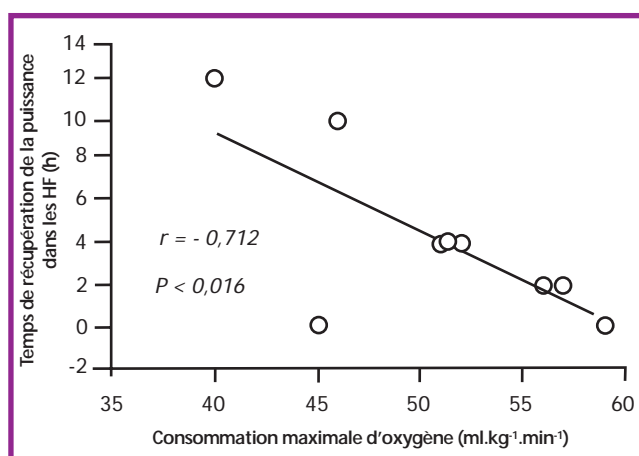


Figure 5 : Relation entre la durée de restauration d'un des indices de l'activité parasympathique (nuHF) et la capacité cardiorespiratoire (16).

> Enregistrements répétés

La labilité de la VFC peut être utilisée dans le temps comme témoin de l'adaptation du contrôle cardiovasculaire en réponse à l'activité physique.

• Enregistrements répétés et adaptations aiguës

Il est maintenant bien établi que durant les heures qui suivent un exercice physique, le niveau de VFC est fortement effondré (Fig. 2) (2, 16). Ensuite, au fil du temps, la variabilité globale et les HF remontent et dépassent même parfois leur niveau initial avant la séance. Ce phénomène de rebond, qui survient dans un délai de 24 à 48 h, rappelle le concept de surcompensation, qui est à la base de tout plan d'entraînement. Et comme il semblerait que ce soient les athlètes possédant la meilleure capacité cardiorespiratoire qui présentent le délai de restauration des HF le plus rapide (Fig. 5) (16), il nous paraît très séduisant d'évaluer la capacité de récupération et la santé physique au travers des cinétiques des HF suivant un effort important.

La figure 6 illustre la cinétique du RMSSD (indice temporel équivalent aux HF) chez deux joueurs professionnels de handball (L1), suite à un exercice intermittent à haute intensité (proche de $VO_2\max$; $2 \times 10'$ de 30"-30" à 95 % de $V_{30-15IFT}$ (22)) réalisé habi-

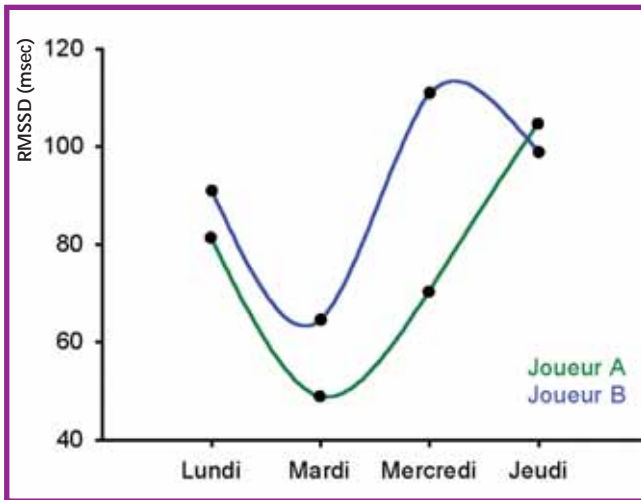


Figure 6 : Evolution du RMSSD au réveil chez deux handballeurs professionnels suite à un exercice intermittent individualisé à haute intensité (lundi soir). Notez les différences de cinétiques entre les deux joueurs aux capacités cardiorespiratoires distinctes.

tuellement le lundi soir. Bien que l'effort soit individualisé, il apparaît clairement que les deux joueurs ne récupèrent pas leurs HF à la même vitesse. Ainsi, en prenant le postulat que les joueurs bénéficieraient d'une meilleure capacité à l'effort en match avec un niveau de HF majoré, notre intervention empirique fût de modifier la programmation de ce type de séance pour le joueur B (qui semble récupérer très vite).

Nous avons ainsi placé le travail intermittent un peu plus tard dans la semaine pour ce joueur (mercredi), espérant le faire plus bénéficié de l'éventuel rebond de HF lors du match du week-end... Cela s'est soldé par un retour positif de la part du joueur. Cependant, la performance en handball étant multifactorielle, il nous a été difficile de juger objectivement (mesure de FC durant le match, efficacité au tir...) du réel

impact de ce changement de programmation.

● **Enregistrements répétés, adaptations chroniques et performance sportive**

Avec la succession quotidienne des charges d'entraînement, ces rebonds à court terme ne sont pas observables. En revanche, le suivi de la VFC jour après jour, ou plus couramment semaine après semaine, au fil d'un entraînement planifié (6), a permis d'illustrer l'intérêt de l'outil pour les sportifs. En effet, la VFC globale, et plus particulièrement les HF, suivaient en général (à l'échelle de la semaine ou du microcycle) la dynamique des charges de travail : dans notre suivi quotidien (Fig. 7), les valeurs de RMSSD augmentaient lors de périodes de travail modéré ou de repos (rebonds lors des trêves) et diminuaient durant les semaines d'entraînement intense ou quand les contenus d'entraînement n'étaient pas destinés à solliciter de manière privilégiée le système aérobie (champion-

nat). Dans l'étude de Pichot et al. (6) (Fig. 8), les HF étaient augmentés initialement avec un entraînement modéré, chutaient en situation de surcharge, puis rebondissaient plus haut lors de la période finale d'affûtage (décharge d'entraînement).

Cependant, en terme de performance sportive, est-il vraiment important d'avoir "récupéré" sa VFC après un cycle de travail ? Est-il toujours profitable d'observer une prédominance parasympathique ? En général, une amélioration de la capacité cardiorespiratoire s'accompagne d'une hausse des HF (4, 23). Il a aussi été montré que les progrès en force musculaire après entraînement étaient corrélés avec la baisse des LF (Fig. 9) (24) et donc, a priori, avec une hausse du rapport HF/(LF+HF).

L'étude de Garet et al (25) illustre bien la relation entre variabilité globale et performance sportive (natation, 400 m crawl) : les résultats montrent une corrélation

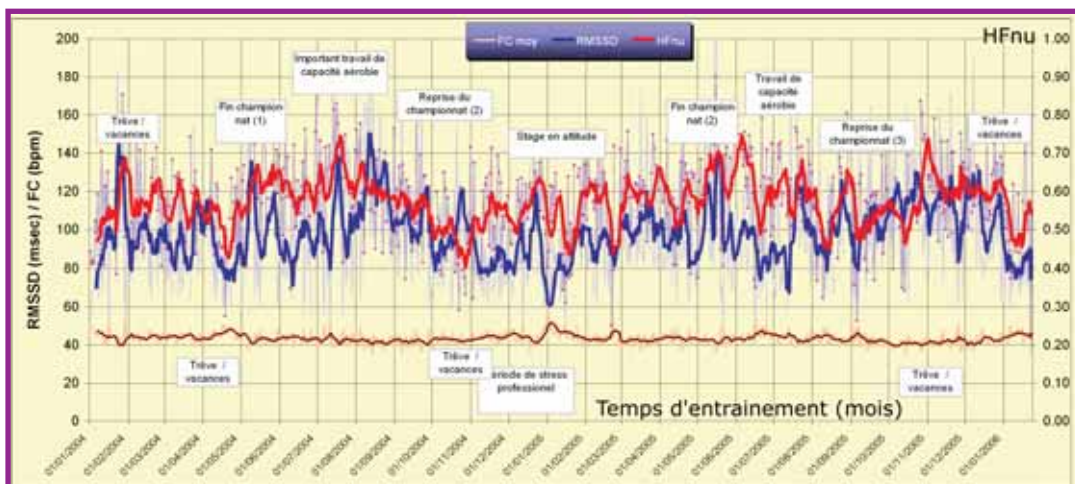


Figure 7 : Evolution quotidienne du RMSSD et du HF/(LF+HF) chez un handballeur au cours de 2 années complètes. Notez les variations en fonction des périodes de l'année et des macro/microcycles de travail. Notez également les évolutions distinctes du tonus parasympathique (RMSSD) et de la balance sympathovagale (HFnu = HF/(LF+HF)).

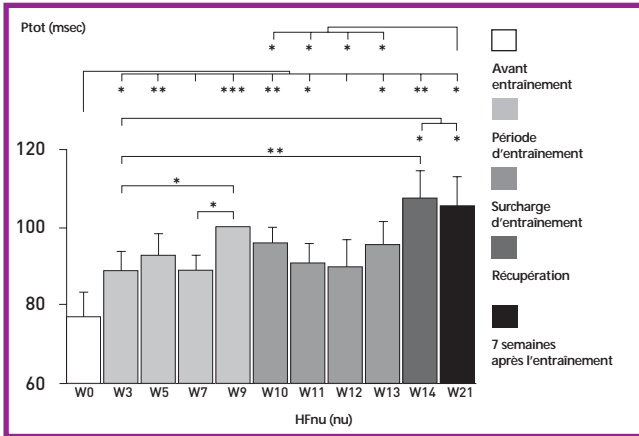


Figure 8 : Evolution du HF chez 6 sujets sédentaires soumis à un entraînement standardisé en laboratoire (6).

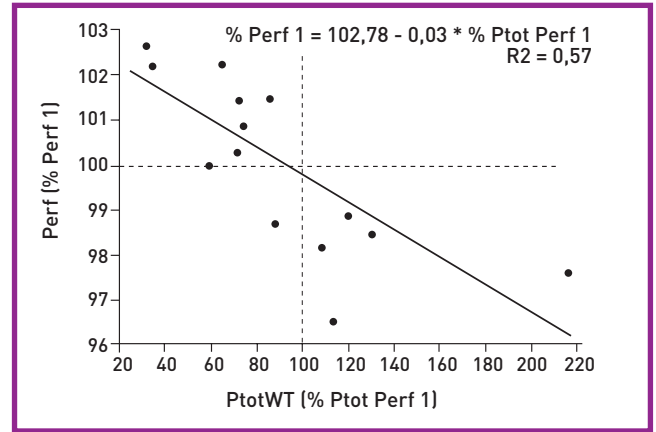


Figure 10 : Relation significative entre le gain de temps sur 400 m et la hausse de VFC globale (Ptot) après entraînement (25).

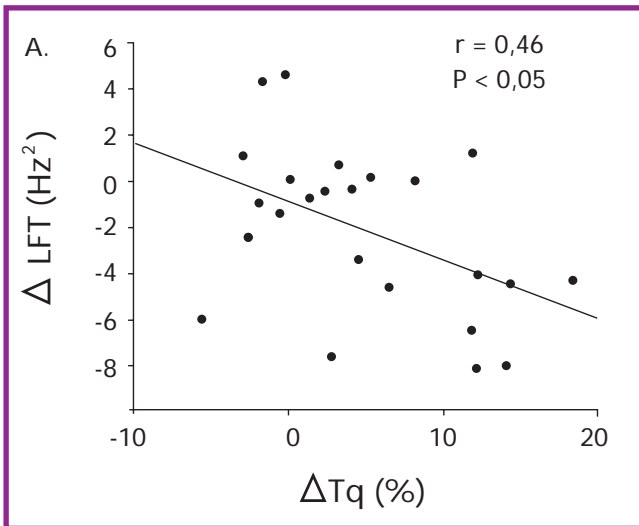


Figure 9 : Relation significative entre le gain de force isocinétique des membres supérieurs et la baisse de LF après entraînement (24).

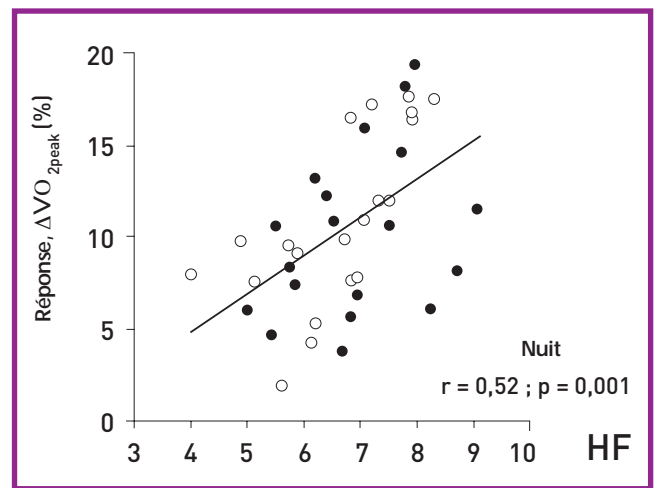


Figure 11 : Relation significative entre la variabilité en HF au début de la période d'entraînement et le gain de VO₂max après cet entraînement (28).

significative entre l'augmentation de VFC après un cycle d'entraînement et l'amélioration du temps de course (Fig. 10). Une autre étude (26) a récemment montré que le niveau de variabilité en LF de la pression artérielle le jour précédent le départ d'un *ironman* (triathlon : 3,9 km de natation - 180 km de vélo - 42,5 km de course à pied) pouvait même permettre de prédire le temps de course (des LF faibles étant associés à un meilleur temps) !

La très grande majorité des études montre ainsi un effet favorable d'une dominance parasympathique sur la performance. De plus, il apparaît que ce sont les sujets qui présentent au départ la plus forte variabilité en HF (il y a de fortes différences interindividuelles - d'origine génétiques a priori) (27) qui sont susceptibles d'améliorer le plus leur VO₂max ou leur temps de maintien à VO₂max (Fig. 11) (29). Les auteurs avancent l'hypo-

thèse qu'un tonus vagal majoré conférerait aux athlètes une meilleure vasomotricité bénéfique à leur progression. En revanche, il a été avancé que l'augmentation de l'activité sympathique chez des canoëistes, la semaine précédant les championnats du monde, pouvait être un facteur de la performance (19). Ainsi, en fonction des différentes évolutions de VFC pourront être attendues.

● Détection des seuils ventilatoires

Une toute nouvelle application de la VFC dans le milieu sportif concerne la détection des seuils ventilatoires lors d'un exercice à intensité progressivement croissante (test classique de VO₂max), et ceci à partir d'un unique enregistrement cardiaque (29, 30) (réalisable de plus sur le terrain avec un cardiofréquence-mètre proposant la fonction R-R). Cette prédiction est basée sur le suivi en temps réel de la variabilité en

HF. Ceci nécessite, par exemple, une méthode d'analyse nouvelle dite de "temps-fréquence" (FFT à fenêtre glissante, STFT), qui permet d'observer au fil du temps à la fois l'évolution de la densité spectrale en HF et la fréquence même du pic HF. Cette dernière est ainsi utilisée pour suivre la fréquence respiratoire, dont l'augmentation au fil de l'effort est bien connue pour marquer deux points de rupture correspondant aux deux seuils ventilatoires (31). De plus, il a aussi été montré qu'avec l'augmentation de l'intensité d'effort, l'évolution de l'amplitude du spectre en HF décrivait un "U" : il diminuait jusqu'au premier seuil ventilatoire avec le retrait de l'activité parasympathique, avant de remonter fortement au-dessus du second seuil, stimulé par les influences mécaniques de la cage thoracique (réflexe de Bain-

bridge (32)). Ainsi, le produit des deux variables ($f_{HF} \cdot HF = f_{HF} \times \text{amplitude HF}$) présente une évolution remarquable lors de l'effort, qui laisse entrevoir les deux seuils ventilatoires (Fig. 12).

> Analyse critique de l'utilisation de la VFC

Un outil limité à certaines populations

Alors que ces premières données laissent apparaître un apport prometteur de la VFC pour le sportif, d'autres données plus récentes viennent malheureusement noircir ce tableau élogieux. Les réponses de variabilité cardiaque au fil d'une période d'entraînement ne sont, dans la pratique, et surtout chez les sportifs de haut niveau, pas toujours aussi simples. L'étude d'Iwasaki et

al. (35) puis les nôtres (14, 33) ont permis de mettre en avant un phénomène particulier, qui se traduit par une évolution "en cloche" des indices de VFC en fonction des charges d'entraînement (Fig. 13 et 14). Concrètement, après la hausse attendue des indices avec une charge d'entraînement modérée (4-8 h.semaine⁻¹ ou 400 à 600 kcal.jour⁻¹), il a été observé, avec une charge d'entraînement plus conséquente (> 18 h.semaine⁻¹ ou > 1 000 kcal.jour⁻¹), et ceci même en l'absence objective de fatigue ou de surmenage (questionnaire et qualité de sommeil), une baisse des indices vers des valeurs comparables à celles d'individus sédentaires. Les mécanismes pouvant expliquer cette évolution paradoxale ne sont pas encore bien établis, mais l'hypothèse d'une saturation des récepteurs cardiaques à l'acétyl-

choline chez ces individus au fort tonus vagal (FC de repos < 45 bpm) reste aujourd'hui la plus probable (34). Quoi qu'il en soit, chez ces individus, la baisse de variabilité ne peut et ne doit pas s'interpréter comme un signe de surcharge et de mauvaise adaptation à l'entraînement. On peut également faire l'hypothèse d'une hausse de variabilité dans un cas de surmenage pour ces sujets, car la diminution de l'activité parasympathique au profit d'une stimulation sympathique renverserait ce phénomène de saturation. L'évolution observée serait ainsi inverse de celle attendue et usuellement décrite. Mais aucune donnée actuelle ne permet pour l'instant de répondre à la question.

Cas particuliers déviants

Enfin, il faut savoir qu'il existe une très grande variabilité interindividuelle, même chez des individus de même sexe et de même âge, présentant des charges d'entraînement et des capacités cardiorespiratoires équivalentes. Les coefficients de corrélations significatifs mais modérés entre VO₂max et HF (Fig. 4) illustrent d'ailleurs cette variabilité interindividuelle. Nous avons ainsi, au cours des dernières années et au travers de plus de 1 000 enregistrements sur le terrain, rencontré une trentaine d'individus présentant des valeurs plus qu'inattendues. Par exemple, Xavier, 27 ans,

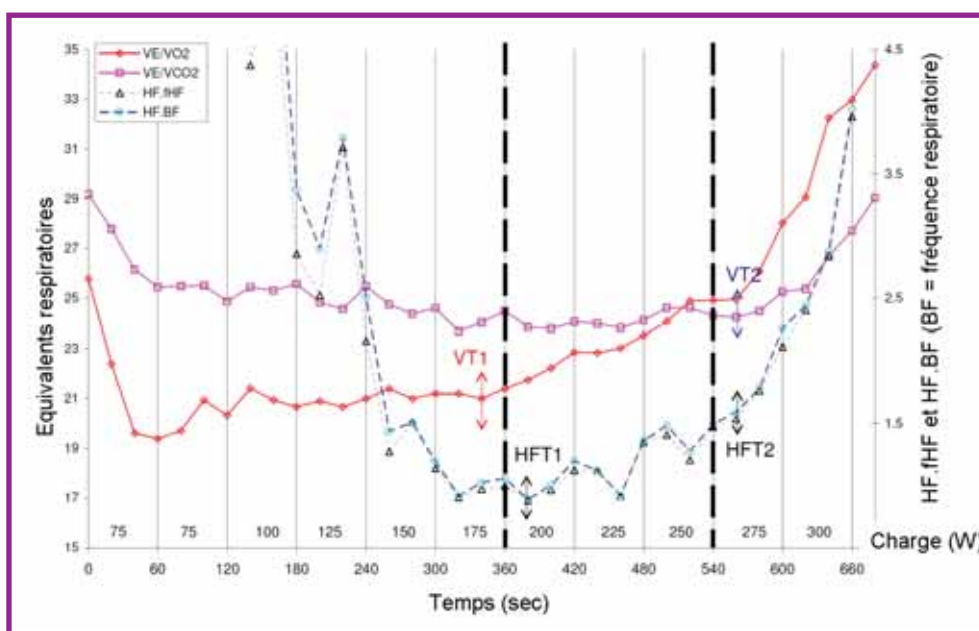


Figure 12 : Evolution des équivalents respiratoires et de l'indice fHF.HF lors d'un test triangulaire. Notez une évolution particulière rendant possible l'estimation des seuils ventilatoires (30).

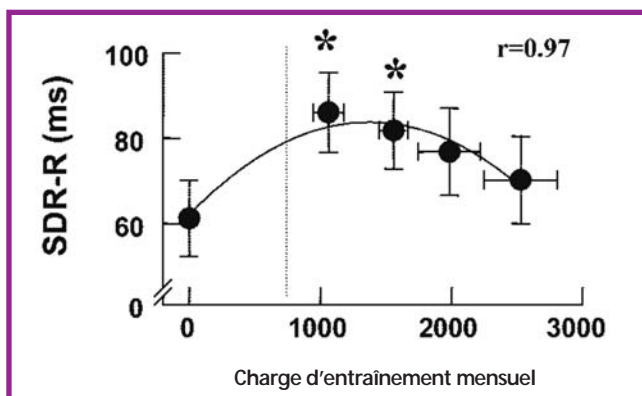


Figure 13 : Evolution de la VFC globale (SDRR) en fonction des charges d'entraînement chez des sujets sédentaires préparant un marathon. Trimp = training impulse. Notez que les sportifs ont tous réussi les temps de course prévus, ce qui écarte l'hypothèse d'un surentraînement (35).

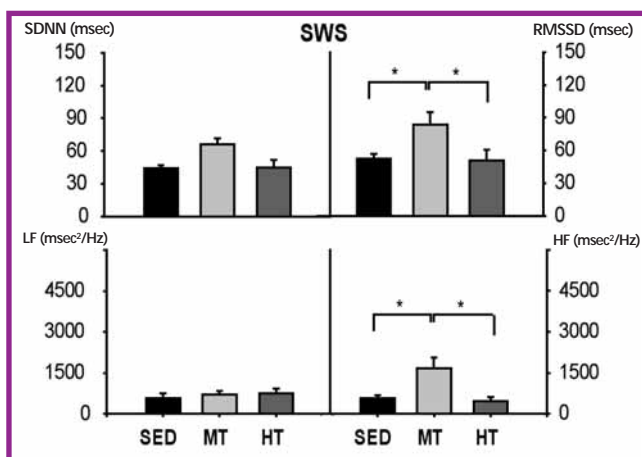


Figure 14 : Niveau de VFC lors du sommeil lent profond (SWS) chez 3 groupes de sujets présentant des charges d'entraînement différentes (Sed = sédentaires, MT = entraînement modéré, HT = entraînement intense) (14). Notez que les individus du groupe HT n'étaient pas en surcharge d'entraînement.

qui ne démontrait aucun signe de surentraînement et qui n'était pas non plus à nos yeux à classer parmi les athlètes "saturés" (FC de repos à 58 bpm), présentait un RMSSD de l'ordre de 11 msec, alors que les sportifs du même âge ont plutôt des valeurs comprises entre 70 et 120 msec... Bien qu'il convienne toujours d'exprimer les évolutions

individuelles de VFC en pourcentage des valeurs initiales, ces sportifs à très faible VFC sont plus facilement sujets à des modifications (artificielles) énormes : alors qu'une variation quotidienne de 10 msec est classiquement observable, cela correspond chez ces individus à une hausse d'un jour à l'autre d'environ 200 % !? De plus, quelques batte-

ments ectopiques ou des mouvements parasites, qui passeraient inaperçus chez un athlète normal, peuvent facilement confondre l'analyse ici.

> En conclusion

Ainsi, un enregistrement ponctuel de VFC, réalisé dans des conditions optimales (le matin au réveil ou lors du sommeil lent profond), pourrait constituer un test prédictif des capacités cardiorespiratoires dans le cadre de la détection des athlètes de demain ou encore du recrutement dans un club sportif professionnel. Ces données apportent des informations inédites par rapport aux tests d'exploration usuels, comme notamment la capacité de progression. Dans le cadre du suivi de l'entraînement, en mettant en rapport les charges d'entraînement et les indices de VFC récoltés à intervalles réguliers, il apparaît que ces derniers puissent rendre compte de l'état d'adaptation du système nerveux autonome, en réponse à l'entraînement et permettent ainsi même de prédire la forme physique et la performance sportive dans les disciplines à dominante aérobie. Cependant, les études sur le terrain sont encore aujourd'hui trop rares et l'extension à d'autres activités telles que les sports collectifs reste encore à développer. Il est aussi important de considérer les quelques limita-

tions de l'outil, liées au probable phénomène de saturation et à certaines déviations individuelles. Ainsi, bien que l'outil VFC semble pertinent et utile pour le suivi de l'entraînement, les informations récoltées ne peuvent suffire à elles seules. Il est important de les interpréter en fonction des charges d'entraînement et de les compléter par d'autres paramètres plus classiques (échelles de perception de l'effort, questionnaires de fatigue...) pour avoir une lisibilité totale des effets de l'entraînement. Enfin, un dernier intérêt de la VFC chez le sportif est la possibilité de détecter les seuils ventilatoires sans avoir recours aux mesures des échanges respiratoires. Bien que cette application s'écarte de la fonction de suivi et d'objectivation de l'activité autonome, elle mérite d'être mentionnée, car la connaissance de tels repères physiologiques est également primordiale dans l'entraînement moderne. ■

Lien : <http://www.martin-buchheit.net>

Mail :

mb@martin-buchheit.net

MOTS CLÉS

Fréquence cardiaque, sportif, entraînement, performance, variabilité sinusoidale, arythmie respiratoire, labilité, capacité cardiorespiratoire

Bibliographie

1. Aubert AE, Seps B, Beckers F. Heart rate variability in athletes. *Sports Med* 2003 ; 33 (12) : 889-919.
2. Furlan R, Piazza S, Dell'Orto S et al. Early and late effects of exercise and athletic training on neural mechanisms controlling heart rate. *Cardiovasc Res* 1993 ; 27 (3) : 482-8.
3. Kenney WL. Parasympathetic control of resting heart rate : relationship to aerobic power. *Med Sci Sports Exerc* 1985 ; 17 (4) : 451-5.
4. Sandercock GR, Bromley PD, Brodie DA. Effects of exercise on heart rate variability : inferences from meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc* 2005 ; 37 (3) : 433-9.
5. Hedelin R, Wiklund U, Bjerle P, Henriksson-Larsen K. Cardiac autonomic imbalance in an overtrained athlete. *Med Sci Sports Exerc* 2000 ; 32 (9) : 1531-3.
6. Pichot V, Busso T, Roche F et al. Autonomic adaptations to intensive and overload training periods : a laboratory study. *Med Sci Sports Exerc* 2002 ; 34 (10) : 1660-6.
7. Uusitalo AL, Uusitalo AJ, Rusko HK. Heart rate and blood pressure variability during heavy training and overtraining in the female athlete. *Int J Sports Med* 2000 ; 21 (1) : 45-53.
8. Task Force. Heart rate variability : standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Circulation* 1996 ; 93 (5) : 1043-65.
9. Malliani A. The pattern of sympathovagal balance explored in the frequency domain. *News Physiol Sci* 1999 ; 14 : 111-7.
10. Viola AU, Simon C, Ehrhart J et al. Sleep processes exert a predominant influence on the 24-h profile of heart rate variability. *J Biol Rhythms* 2002 ; 17 (6) : 539-47.
11. Brown TE, Beightol LA, Koh J, Eckberg DL. Important influence of respiration on human R-R interval power spectra is largely ignored. *J Appl Physiol* 1993 ; 75 (5) : 2310-7.
12. Buchheit M, Richard R, Doutreleau S et al. Effect of acute hypoxia on heart rate variability at rest and during exercise. *Int J Sports Med* 2004 ; 25 (4) : 264-9.
13. Cottin F, Medigue C, Lepretre PM et al. Heart rate variability during exercise performed below and above ventilatory threshold. *Med Sci Sports Exerc* 2004 ; 36 (4) : 594-600.
14. Buchheit M, Simon C, Piquard F et al. Effect of increased training load on vagal-related indexes of heart rate variability : a novel sleep approach. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2004 ; 287 (6) : H2813-8.
15. Brandenberger G, Buchheit M, Ehrhart J et al. Is slow wave sleep an appropriate recording condition for heart rate variability analysis ? *Auton Neurosci* 2005 ; 121 (1-2) : 81-6.
16. Hautala A, Tulppo MP, Makikallio TH et al. Changes in cardiac autonomic regulation after prolonged maximal exercise. *Clin Physiol* 2001 ; 21 (2) : 238-45.
17. Buchheit M, Simon C, Viola AU et al. Heart rate variability in sportive elderly : relationship with daily physical activity. *Med Sci Sports Exerc* 2004 ; 36 (4) : 601-5.
18. Buchheit M, Simon C, Charlux A et al. Heart rate variability and intensity of habitual physical activity in middle-aged persons. *Med Sci Sports Exerc* 2005 ; 37 (9) : 1530-4.
19. Iellamo F, Legramante JM, Pigozzi F et al. Conversion from vagal to sympathetic predominance with strenuous training in high-performance world class athletes. *Circulation* 2002 ; 105 (23) : 2719-24.
20. Bosquet L, Papelier Y, Leger L, Legros P. Night heart rate variability during overtraining in male endurance athletes. *J Sports Med Phys Fitness* 2003 ; 43 (4) : 506-12.
21. Buchheit M, Gyndre C. Relative contribution of cardiorespiratory fitness and training-load to cardiac autonomic function. *Am J Physiol* 2006, in press.
22. Buchheit M. The 30-15 intermittent fitness test : relevance for interval training of intermittent sport players. ECSS proceedings, Belgrade, 2005.
23. Aubert AE, Ramaekers D, Cuche Y et al. Effect of long term physical training on heart rate variability. *Computers in Cardiology* 1996 : 17-20.
24. Hedelin R, Bjerle P, Henriksson-Larsen K. Heart rate variability in athletes : relationship with central and peripheral performance. *Med Sci Sports Exerc* 2001 ; 33 (8) : 1394-8.
25. Garet M, Tournaire N, Roche F et al. Individual Interdependence between nocturnal ANS activity and performance in swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 2004 ; 36 (12) : 2112-8.
26. Gratze G, Rudnicki R, Urban W et al. Hemodynamic and autonomic changes induced by Ironman : prediction of competition time by blood pressure variability. *J Appl Physiol* 2005 ; 99 (5) : 1728-35.
27. Singh JP, Larson MG, O'Donnell CJ et al. Heritability of heart rate variability: the Framingham Heart Study. *Circulation* 1999 ; 99 (17) : 2251-4.
28. Hautala AJ, Makikallio TH, Kiviniemi A et al. Cardiovascular autonomic function correlates with the response to aerobic training in healthy sedentary subjects. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2003 ; 285 (4) : H1747-52.
29. Blain G, Meste O, Bouchard T, Berman S. Assessment of ventilatory thresholds during graded and maximal exercise test using time varying analysis of respiratory sinus arrhythmia. *Br J Sports Med* 2005 ; 39 (7) : 448-52.
30. Cottin F, Leprêtre P, Lopes P et al. Assessment of ventilatory thresholds from heart rate variability in well-trained subjects during cycling. *Int J Sports Med* In press, 2006.
31. Wasserman K, Whipp BJ, Koysl SN, Beaver WL. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol* 1973 ; 35 (2) : 236-43.
32. Cottin F. Effet de l'exercice sur le contrôle cardiovasculaire : interactions entre le système nerveux autonome et le mode ventilatoire. Thèse Paris-Sud, 1999.
33. Buchheit M, Simon C, Charlux A et al. Relationship between very high physical activity energy expenditure and heart rate variability and self-estimate of health status in middle-aged individuals. *Int J Sports Med* in press, 2006.
34. Goldberger JJ, Challapalli S, Tung R et al. Relationship of heart rate variability to parasympathetic effect. *Circulation* 2001 ; 103 (15) : 1977-83.
35. Iwasaki K, Zhang R, Zuckerman JH, Levine BD. Dose-response relationship of the cardiovascular adaptation to endurance training in healthy adults : how much training for what benefit ? *J Appl Physiol* 2003 ; 95 (4) : 1575-83.