

Le cardiofréquencemètre : de la théorie à la pratique

L'objectif de cet article est certes, de repréciser l'intérêt de l'utilisation de la fréquence cardiaque en tant que reflet fidèle et fiable de l'intensité de l'activité physique exercée, mais aussi de définir les modalités pratiques d'utilisation du cardiofréquencemètre chez le sportif d'endurance, comme chez les patients en mal d'activité physique ; enfin, de guider le médecin et l'utilisateur dans le bon choix du modèle le plus approprié en fonction de l'objectif visé.

Dr Thierry Laporte (Cardiologue du sport, Unité Médicale Activité Physique et Sportive, Clinique Bagatelle, Bordeaux)

La pratique d'une activité physique programmée et encadrée est actuellement le théâtre d'un véritable engouement, surtout depuis qu'il a été scientifiquement prouvé que l'exercice régulièrement pratiqué permettait d'obtenir un véritable "passport santé". Ce bénéfice est réel, en prévention primaire et secondaire, pour tout patient insuffisant cardiaque, coronarien, hypertendu, mais aussi chez les diabétiques, pour les syndromes métaboliques, les patients pléthoriques et plus généralement pour toute personne sédentaire, ce qui élargit considérablement le nombre potentiel de candidats à un programme d'activité physique personnalisé.

Les techniques d'entraînement dans le domaine des activités sportives dites "d'endurance" ont considérablement progressé ces deux dernières décennies. D'une approche approximative, basée sur les "sensations", nous sommes passés au stade d'une planification d'entraînement plus personnalisée, plus rationnelle et plus efficace et ce, en grande partie grâce à la possibilité de surveiller précisément l'intensité de l'activité physique par l'utilisation d'un cardiofréquencemètre (CFM).

Ce suivi de l'intensité des séances d'entraînement, par le *monitoring* de la fréquence cardiaque (FC), marque

une avancée considérable dans le contrôle physiologique de l'adaptation de l'être humain à l'effort. Pour cette raison, on peut effectivement parler d'une approche "scientifique" de l'entraînement, qui est à comparer avec l'empirisme des méthodes utilisées auparavant.

Ce progrès dans la gestion de la pratique régulière d'une activité physique et/ou sportive a indiscutablement joué un rôle dans le véritable engouement actuel pour la pratique de ces disciplines sportives "de masse", que sont la course à pied, le cyclisme et le cyclotourisme. Il suffit de constater le nombre d'engagés à un marathon comme celui de Paris, qui a été décuplé en dix ans, pour s'en convaincre. Cependant, il persiste encore un paradoxe entre la reconnaissance unanime de l'intérêt de l'utilisation du contrôle de l'intensité de l'effort par la FC et la réalité pratique. En fait, bien souvent encore, le CFM est sous, mal utilisé, voire carrément abandonné au bout d'un certain temps de pratique décevante. Cette constatation a été objectivement confirmée lors d'une récente enquête prospective que nous avons réalisée en 2002, auprès de 190 sportifs semi-marathoniens. A la question « Pensez-vous que le cardiofréquencemètre soit utile ? », 80 % ont

répondu par l'affirmative. A la question « L'utilisez-vous régulièrement ? », seulement 40% ont répondu "oui". Ce paradoxe est très certainement lié à une méconnaissance des bonnes règles d'utilisation du CFM et ce, certes de la part des utilisateurs, mais aussi, souvent, des médecins "prescripteurs".

> La FC : le compte-tour de la machine humaine

« La vie, c'est le mouvement »

Le mouvement est conditionné par l'activité des muscles striés squelettiques. Tout comme pour les moteurs à combustion interne, l'usine bio-énergétique humaine assure la transformation de l'énergie chimique fournie par les aliments ingérés (le carburant) en énergie mécanique fournie par l'activité musculaire grâce à la production d'ATP.

Le comburant indispensable pour toute sollicitation musculaire prolongée est l'oxygène qui, prélevé dans l'air ambiant, véhiculé et extrait de la circulation sanguine par les cellules musculaires, est utilisé dans de véritables centrales énergétiques intracellulaires (les mitochondries).

Chez tout être humain vivant, il existe une même relation directe et pro-

portionnelle entre la quantité d'O₂ utilisée (consommée) et la quantité d'énergie mécanique produite (exprimée en watts).

Ainsi, il est donc possible d'estimer une VO₂ (consommation d'O₂) en fonction du type et de l'intensité de l'activité physique réalisée. Pour la pratique, des tables d'équivalence ont été publiées, dans lesquelles chaque activité de la vie quotidienne est quantifiée en nombre de MET : *the metabolic equivalent task* (1 MET équivalant à 3,5 ml/kg/min de VO₂). Par exemple, lors de la marche ou de la course à pied, chaque km/h nécessite une dépense d'environ 1 MET (se déplacer à 10 km/h en courant sollicite chez tout le monde une consommation de 35 ml/kg/min d'O₂).

Exemples concrets

• 1^{er} exemple

Tout être humain, quelque soit son âge, son poids, sa taille ou sa condition physique, sollicitera toujours la même consommation d'O₂ (par unité de poids corporel) pour réaliser la même activité à la même intensité. Ainsi, courir à 10 km/h équivaut à mobiliser 35 ml/kg/min de VO₂ (selon la formule de Luc Léger : VO₂ (ml/kg/min) = V (km/h) x 35)... Donc, pour un sujet de 70 kg, cela correspond à une VO₂ absolue ou "brute" de (35 ml x 70 kg =) 2 450 ml/min. Or, nous savons d'après la formule de Fick que :

$$VO_2 = \text{Débit cardiaque (VES x FC) x DAV en O}_2,$$

DAV : différence artéro-veineuse.

Prenons l'exemple d'un sujet sédentaire en bonne santé :

- son volume d'éjection systolique "à 10 km/h" sera de l'ordre de 100 ml/min ;
- sa capacité intramusculaire mitochondriale d'extraction de l'O₂ avoisinera les 15 ml/min pour 100 ml/min de débit sanguin, soit une DAV en O₂ de 15 % (0,15) ;
- donc, le système nerveux central (le

"cardiostat") (3) devra stimuler le nœud sinusal pour permettre d'atteindre les 163 battements/min indispensables pour assurer l'apport de la quantité nécessaire en O₂ (2 450 ml = 100 ml x 163 x 0,15), pour permettre ce travail mécanique (courir en endurance à 10 km/h). Supposons que ce sujet s'adonne à quelques mois d'un entraînement efficace :

- toutes les études montrent que son volume d'éjection systolique pour le même niveau d'effort ("à 10 km/h") aura progressé pour atteindre environ 120 ml/min ;
- sa capacité musculaire d'extraction de l'O₂ sera elle aussi meilleure et pourra avoisiner les 20 ml/min pour 100 ml de débit sanguin ;
- maintenant, le cardiostat devra moins stimuler le nœud sinusal ; 102 bat/min suffiront pour assurer les 2 450 ml toujours nécessaires pour courir à 10km/h (2 450 = 120 x 102 x 0,20).

• 2^e exemple

Supposons un autre individu ayant le même niveau d'entraînement, mais pesant 10 kg de plus que le précédent (soit 80 kg). Ce dernier aura besoin d'utiliser 2 800 ml d'O₂ (35 ml/kg/min x 80) pour courir à 10 km/h et le cardiostat devra afficher alors environ 120 bat/min (2 800 / 120 x 0,20).

Ces deux exemples démontrent bien que la FC est le seul facteur modulable et immédiatement modifiable grâce à l'action du système nerveux central sur le nœud sinusal, d'où la dénomination de "cardiostat" de la VO₂, proposée par Noakes en 2003. Le rôle de la FC est d'adapter en permanence sa valeur aux circonstances, de façon à maintenir constante la quantité d'O₂ requise par les muscles concernés.

En pratique quotidienne

Ces exemples permettent de mieux

appréhender certaines notions essentielles de la vie courante.

• Pour un même effort

Pour un même effort (courir à 10 km/h, par exemple), chacun utilise une valeur de FC différente. Ce chiffre varie d'un sujet à l'autre en fonction de son poids, de sa "cylindrée cardiaque" (VES) et de la composition de ses muscles striés (nombre de mitochondries, déterminant l'importance du pouvoir de captation de l'O₂).

• La FC maximale

La FC maximale (FC_{max}), que chaque individu peut atteindre, est purement individuelle. Elle reste étroitement sous l'influence de la commande nerveuse centrale (mais aussi des conditions ambiantes : température, hygrométrie...). Il est d'ailleurs très fréquent de retrouver des chiffres nettement supérieurs aux valeurs théoriques pour l'âge, chez les "vieux" sportifs d'endurance ou les athlètes de haut niveau. Ainsi la pente de la relation FC/VO₂ est une donnée purement individuelle (1) lorsqu'elle est exprimée en valeurs brutes et non en pourcentage de FC_{max} et de VO₂max (Fig. 1).

Enfin, il n'existe pas une, mais plusieurs "FC_{max}", selon la discipline sportive pratiquée (généralement pour le même individu et dans les mêmes conditions ambiantes, la course à pied génère une FC_{max} supérieure d'environ 10 bat/min à celle observée en cyclisme).

• Lors d'un effort de longue durée

Lors d'un effort dont la durée dépasse environ 20 min et réalisé à une intensité constante, on assiste à une véritable "dérive" de la FC vers le haut, celle-ci pouvant, dans certaines conditions, atteindre plus de 15 bat/min, voire encore plus dans des épreuves très longues !

Il existe deux explications logiques pour expliquer ce phénomène inéluctable(2).

1. Une partie de cette dérive est tout naturellement proportionnelle au degré de déshydratation, mais aussi aux conséquences de la thermorégulation, ces facteurs étant d'autant plus importants que la température ambiante est élevée. Il s'en suit une diminution du volume d'éjection systolique (de 120 à 100 ml/min dans l'exemple précédent, le cardiostat entrant alors immédiatement en jeu, entraînant l'accélération de la FC, qui passe dans ce cas de 110 à 125 bat/min pour compenser et assurer le même apport d'O₂ au niveau des muscles concernés). Ainsi, en pratique quotidienne, l'observation d'une inexorable montée de la FC lors d'une séance d'entraînement à intensité constante doit alerter et inciter le sujet à une réhydratation urgente.

2. Une partie (probablement plus faible) de cette dérive a une explication physiologique toute autre. En effet, lors des activités physiques prolongées, il se produit inmanquablement une

fatigue de l'organisme et donc, une diminution de "l'efficacité du geste" : la foulée devient plus pesante (quel marathonien n'a pas ressenti ce phénomène sur les dix derniers kilomètres ?), le coût énergétique de l'effort entrepris augmente et, pour reprendre l'exemple, courir à 10 km/h nécessite alors un peu plus de dépense énergétique qu'au début : de 35, la quantité d'O₂ nécessaire peut approcher les 40 ml/kg/min. Le volume d'éjection systolique ne pourra donc pas augmenter, l'extraction musculaire d'O₂ étant elle aussi à son maximum, le cardiostat (3) entre alors en jeu, en augmentant la valeur de la FC pour permettre de fournir les 40 ml/kg/min requis.

En pratique, il est très difficile de faire la part exacte des responsabilités de l'un ou l'autre des facteurs. Outre l'indispensable réhydratation, il est néanmoins conseillé au sujet, surtout s'il court ou pédale à la limite supérieure d'une zone d'entraînement préétablie (notamment s'il s'agit du 2^e seuil), de

ralentir pour se retrouver dans les zones d'intensité initiales. Ce qui introduit une notion fondamentale pour toute personne qui utilise un CFM lors d'une activité physique prolongée : celle d'un travail réalisé en *positive split*, c'est-à-dire avec une 2^e partie d'épreuve réalisée à "un niveau de travail mécanique" plus faible que lors de la 1^{re} partie. Il s'agit là d'une inéluctable logique physiologique, bien que cela puisse choquer et déplaire aux partisans du travail en *negative split*, très utilisée jusqu'à maintenant par les athlètes qui terminent leurs épreuves en accélérant sur les derniers kilomètres. Néanmoins, certains et non des moindres (comme Radcliffe, championne du monde de marathon à Helsinki) se mettent à utiliser cette tactique du *positive split*.

> Un véritable "coach" individuel

Le CFM est un partenaire efficace sous réserve de l'utiliser à bon

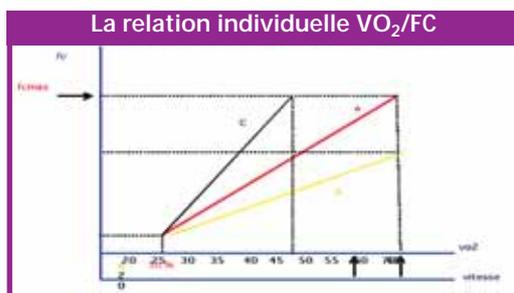


Figure 1 : Sur l'exemple suivant, 3 sujets présentent des profils différents : A et B ont la même VO₂max (et donc la même VMA), mais des FCmax différentes et donc, des valeurs de FC intermédiaires différentes aux mêmes vitesses intermédiaires. Par contre, A et C ont la même valeur de FCmax, C ayant un niveau plus faible (VO₂max inférieure). A 90 % de sa VO₂max (45 ici), il sera à 95 % de sa FCmax, soit à 160 bat/min, alors que A, au même niveau de dépense énergétique (45 ml/kg/min), ne sera qu'à 70 % de sa VO₂max, donc à environ 75 % de sa FCmax, soit à 130 bat/min.



Figure 2 : L'ergomètre utilisé doit être le plus proche possible de la pratique sportive du sujet.

escient. Pour cela, il faut passer par l'indispensable et incontournable étape préliminaire de la mise en place des fameuses zones cibles (intervalles de FC de 5 à 10 bat/minute) qui sont propres à chaque individu.

Détermination directe des zones d'entraînement

La détermination "directe", grâce au test d'effort, est le moyen d'étalonnage le plus précis. Indispensable chez le cardiaque à rééduquer, ce test préalable est aussi fortement recommandée dans de nombreuses situations chez le sportif qui veut se lancer dans la pratique d'une activité à forte sollicitation cardiovasculaire (groupes IIIa à IIIc de la classification de Mitchell, regroupant, entre autre, la course à pied et le cyclisme, les activités sportives "aérobies" les plus pratiquées) (Fig. 2) et dont les indications sont bien établies actuellement (recommandations de la Société Européenne de Cardiologie en mai 2005).

L'idéal est de pouvoir profiter du test pour réaliser en même temps une mesure des échanges gazeux à l'effort

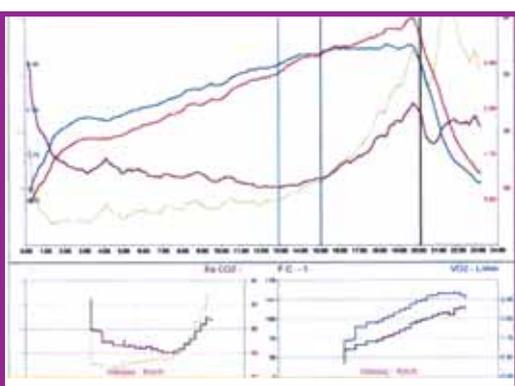


Figure 3 : Exemple d'un test réalisé sur tapis roulant, selon un protocole adapté de type "luc léger", avec détermination des deux seuils par l'analyse des échanges gazeux ; le décrochage des équivalents respiratoires en O₂ (jaune) et en CO₂ (violet) sont nettement marqués, notamment lorsque le travail "mécanique" (ici la vitesse sur le tapis) est utilisé en abscisse.

(4). En effet, ce test complet permet de déterminer de façon précise la VO₂max (ou le pic de VO₂) et la FCmax, mais aussi et surtout, les fameux indices intermédiaires ou "seuils", respectivement (5) :

- le 1^{er} seuil, encore dénommé "aérobie" ou seuil "d'endurance" (ou encore "d'adaptation ventilatoire", voire "anaérobie ventilatoire" !)
- le fameux 2^e seuil, dit "anaérobie" ou seuil de "résistance dure" ou de "désadaptation ventilatoire", qui est surtout retrouvé chez le sportif.

Ce bilan initial exhaustif fournit l'ensemble des renseignements utiles, permettant ensuite de "calibrer" le CFM. Hélas, encore trop peu de centres sont équipés d'un tel plateau technique. Par ailleurs, il faut reconnaître que l'interprétation des résultats reste encore très "opérateur-dépendante" et donc, entachée d'une importante variabilité inter-observateur.

Quoiqu'il en soit, il faut pouvoir réaliser le test d'évaluation sur un ergomètre adapté (coureur sur tapis roulant, avec un protocole "vitesse sans pente" (6) si le modèle de tapis le permet ; cycliste sur cycloergomètre...) (Fig. 3 et 4). Ce bilan initial, surtout s'il est "standard", c'est à dire

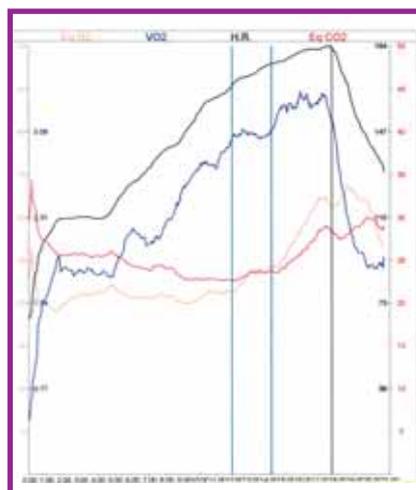


Figure 4 : Test d'évaluation réalisé sur cycloergomètre chez un cycliste de 38 ans. FC max : 185/mn ; FC seuil 1 : 167/mn ; FC seuil 2 : 175/mn.

effectué "sans la VO₂" doit être mené jusqu'à "épuisement" chez le sujet asymptomatique ou "le plus loin possible" chez le cardiaque connu et ce, de façon à pouvoir, outre l'analyse de l'adaptation cardiovasculaire à l'effort et de la réserve coronarienne, déterminer la FCmax.

Détermination "indirecte" des zones cibles

Détermination "indirecte" signifie "extrapolée" à partir d'un repère ou de plusieurs "repères" connus.

• La FC maximale

Encore trop souvent, la valeur retenue (la fameuse FCmax "théorique pour l'âge", 220-âge) est très éloignée du chiffre véritable. En effet, il faut se souvenir que cette formule correspond à une valeur moyennée pour un âge donné, avec une marge d'erreur à l'échelon individuel parfois de près de 20 points (7) !

La première étape consiste donc à établir la FCmax réelle et individuelle du futur utilisateur du CFM, soit comme nous l'avons vu lors d'un test de laboratoire "maximal", soit lors d'un test dit de "terrain".

Qui peut se contenter d'un "test de terrain" ? Toute personne chez qui le test d'effort préalable n'est pas indiqué (sujet jeune, asymptomatique, sans facteur de risque ni antécédents familiaux de cardiopathies) et, éventuellement, un individu chez qui un test d'effort standard s'est révélé normal, mais qui n'a pas permis (matériel inadapté, test sur cycloergomètre chez un coureur à pied...) d'obtenir un test véritablement maximal dans la discipline sportive concernée.

Il existe une multitude de tests validés : test de Brue, Vam-éval, Cat-test... Plus simplement, il est possible, en course à pied (idéalement sur une piste de 400 m), de débiter avec un 1^{er} tour d'échauffement, d'effectuer le 2^e à une

intensité modérée, le 3^e plus vite, en accélérant sur le dernier tour pour terminer au sprint sur le dernier 100 m. La valeur de FC retenue est celle s'affichant au passage de la ligne d'arrivée.

• La FC de repos

Sa détermination précise n'est pas indispensable. En effet, celle-ci est beaucoup plus variable d'un jour à l'autre que la FCmax. Enfin, sa détermination exacte est fastidieuse : le matin, avant le lever, à jeun, sur une 10^e de minutes, moyennée sur 3 jours consécutifs et répétée le plus souvent possible ! Si une valeur basse peut témoigner d'une bonne condition physique et inversement, un chiffre élevé d'un état de fatigue, elle ne préjuge nullement de son potentiel d'incrémentation à l'effort.

• La FC de réserve

Elle est très utilisée par Karvonen pour établir ses zones et correspond à la différence entre la FCmax et la FC de repos. Il est évident que plus cette réserve sera importante, plus la plage d'utilisation du compte-tour sera importante et donc plus sera déterminant le rôle de la FC dans la progression de la VO₂ à l'effort.

• La FC de récupération

Il s'agit d'une valeur intéressante à analyser, très dépendante du niveau de forme et peu sensible aux facteurs externes. En pratique, on parle de bonne récupération si la FC a baissé d'au moins 30 % (par rapport au chiffre absolu obtenu en fin d'exercice) à la 3^e minute de récupération.

• Les zones cibles de travail

La méthode la plus sophistiquée pour les déterminer est celle utilisant la formule de Karvonen, dans laquelle la FC "cible" est égale à la fréquence de repos plus un pourcentage de la FC de réserve. Ainsi, une séance à 85 % de sa VO₂max se calculera en addi-

tionnant la fréquence de repos à 85 % de la FC de réserve.

Néanmoins, ce calcul est assez fastidieux, long à mettre en place et toujours dépendant de l'incertitude liée à la variabilité de la fréquence de repos. La méthode la plus pratique est donc celle utilisant un simple pourcentage de la FCmax. En effet, la relation entre le pourcentage de FCmax et le pourcentage de VO₂max reste identique chez tout individu. Ainsi, réaliser une séance à 85 % de sa VO₂max correspond "à peu de chose près" à solliciter entre 90 et 95 % de sa FCmax (Fig. 5).

> Mise en place d'un programme d'entraînement

Cette planification sera individualisée en fonction du potentiel de chacun et, surtout, des objectifs personnels.

Pour le cardiaque en phase de reconditionnement

L'objectif se centrera sur des séances en endurance "fondamentale", classique zone d'utilisation préférentielle des graisses, tout en y incluant quelques séances "au 1^{er} seuil" ; ces dernières se pratiqueront donc à un pourcentage de VO₂max plus élevé, mais sur une durée plus courte.

• Utilisation des repères établis lors d'un test d'évaluation "complet"

Les séances en endurance fonda-

mentale pourront être réalisées sur une durée d'environ 1 h, en utilisant une plage d'activité (limite inférieure : FC "seuil" moins 15/min ; limite supérieure : FC "seuil"), en débutant par une phase d'échauffement de 10 min à FC "seuil" moins 20/min.

Les séances au seuil, en respectant toujours une phase d'échauffement similaire, seront réalisées entre FC "seuil" et FC "seuil" plus 10 pulsations/min.

• Programme basé sur l'utilisation de repères "extrapolés"

Ces derniers ayant été établis lors d'une épreuve d'effort "standard" ou un test de terrain, il sera important de tenir compte du niveau de condition physique préalable de chacun :

- chez un sujet sédentaire, il est raisonnable d'estimer que son 1^{er} seuil est précoce, aux alentours de 65, voire 70 % de sa VO₂max, soit entre 70 et 75 % de sa FCmax ; il faut donc programmer la séance d'endurance fondamentale entre 60 et 65 % de sa FCmax et la séance "au 1^{er} seuil présumé" entre 70 et 75 % de la FCmax ;
- chez un sujet en bonne forme physique ou sportif, le seuil est plus tardif, il ne faut alors pas hésiter à permettre la séance d'endurance à 75 % de la FCmax et près de 85 % pour la séance "au seuil" ;
- dans tous les cas de figure, comme pour tout programme d'entraînement, il faut respecter les périodes de récupération et "optimiser" les phases

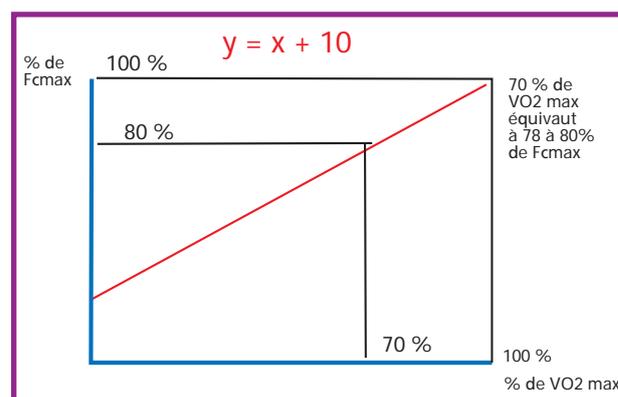


Figure 5 : A partir de 50 % de la VO₂max, il existe une relation linéaire directe entre le pourcentage de VO₂max et le pourcentage de FCmax ($y = x + 10$). Dans quelques cas, cette pente s'infléchit sur la fin (seuil de "Conconi"), c'est-à-dire à partir du 2^e seuil.

de "surcompensation", avec au moins 2 séances par semaine, idéalement 3 sorties, en alternant "endurance" et travail "au seuil" d'une séance à l'autre.

Pour le sportif averse de performances

Le programme sera plus diversifié et, lui aussi, très différent selon l'objectif que le sportif s'est fixé : le marathonien (8) n'aura pas le même "menu" que le coureur de 10 km, a fortiori que le coureur pratiquant dans le seul but d'entretenir sa condition physique.

L'entraînement sera beaucoup plus varié (9), avec l'indispensable pratique de séances dites "qualitatives", réalisées à haute intensité, au niveau du 2^e seuil "en résistance dure", souvent à plus de 90 % de sa FCmax, soit "en continu" sur une durée de 20 à 30 min, soit en *interval training* avec, par exemple, 3 fois 10 min au 2^e seuil, entrecoupés de phases de récupération active de la même durée en "endurance fondamentale", sans oublier les classiques sorties "en VMA", le plus souvent réalisées sur des répétitions d'intervalles très courts de 30 s à 100, voire 110 %, de la "VMA" (vitesse maximale aérobie, qui est la vitesse atteinte au palier correspondant à la VO₂max). Lors de ces dernières séances, la FC n'ayant "pas le temps" de monter à sa valeur maximale, le CFM n'est pas utilisable, si ce n'est comme chronomètre.

Il n'existe pas de programme standard ou de référence absolue dans ce domaine, chacun puisera alors dans la littérature, très abondante sur le sujet, pour trouver le programme qui correspond le mieux à ses objectifs et à sa disponibilité.

> Quel CFM utiliser ?

Le CFM est un simple système électronique, composé de 2 éléments : une ceinture émettrice pectorale capte l'ac-

tivité électrique du cœur et l'envoie vers une montre réceptrice qui convertit en numérique, affiche et mémorise les valeurs. Depuis peu, sur certains systèmes s'est rajouté un 3^e élément, qui permet de connaître la vitesse de course et la distance parcourue.

Au fil du temps, les modèles se sont sophistiqués, en offrant une multitude de fonctions et d'options, dont bien sûr, l'intérêt d'utilisation varie en fonction des objectifs de chacun (10).

Nous allons essayer de les passer en revue, sans citer de marque ou de modèle précis. Néanmoins, lorsque l'on se fie totalement à l'appareil, il ne faut pas lésiner sur la fiabilité et toujours choisir un modèle d'une marque de renom, quitte à dépenser quelques euros de plus.

Les fonctions basiques

L'émetteur a fait peu de progrès : il reste sous la forme d'une ceinture assez volumineuse et disgracieuse, avec deux capteurs de part et d'autre du sternum.

Des ceintures en textile, plus souples et plus agréables à utiliser, sont actuellement proposées sur les modèles récents.

Les capteurs analysés se révèlent être très fiables, plusieurs études ont retrouvé une corrélation de 0,97 entre les valeurs enregistrées et celles de référence sur un test d'effort (soit une différence maximale de 3 à 4 pul/min) (11). L'émission des signaux vers le récepteur se fait en utilisant une longueur d'onde précise. La plupart des modèles sont proposés "codés", ce qui permet d'éviter les interférences avec son voisin. Ce codage n'est cependant pas absolu, car il est choisi sur une gamme d'environ 20 longueurs d'onde différentes, avec donc 1 chance sur 20 d'émettre avec la même fréquence que son voisin !

Au fil du temps, le récepteur s'est un peu miniaturisé. Les FC sont affichées par "pas" de 5 s au minimum. Seuls

certaines appareils "haut de gamme" arrivent à proposer du *beat by beat*.

Les zones de travail sont mémorisables, sauf sur les modèles d'entrée de gamme. Une alarme sonore peut être programmée pour signaler une "sortie de zone". Ainsi, le "CFM minimum" se doit d'être petit, avec un écran clair et un affichage bien net des données. Il doit aussi permettre de lire le temps d'exercice écoulé et de programmer au moins une zone de travail, avec une alarme sonore et une fonction d'éclairage du moniteur. Un modèle de ce type peut déjà satisfaire bon nombre d'utilisateurs (compter environ 80 à 100 euros).

Les fonctions avancées

Les fonctions avancées concernent les modèles "milieu de gamme". Ils possèdent des fonctions supplémentaires (11, 12).

• Le calcul de la dépense énergétique

Le calcul de la dépense énergétique est basé sur la formule :

$$\text{Kcal moyen} = 1 \text{ Kcal/kg/km,}$$
 Donc, un sujet de 70 kg parcourant 10 km dépense 700 Kcal (± 50).

Il permet de contrôler la consommation d'énergie et d'adapter son régime diététique en conséquence.

• Le calcul de l'indice de forme

Certaines marques intègrent, depuis quelques années, le recueil d'un indice dont la valeur semble très comparable à la VO₂max d'après plusieurs études comparatives réalisées. En effet, elles retrouvent une corrélation "correcte" entre ces deux mesures, ce qui permet le suivi régulier de la condition physique et de son amélioration grâce à l'entraînement.

Cette approche est certes séduisante, mais elle est fait appel à certains paramètres "subjectifs" (le sujet doit auto-évaluer son niveau d'activité physique) et à une certaine contrainte qu'est la

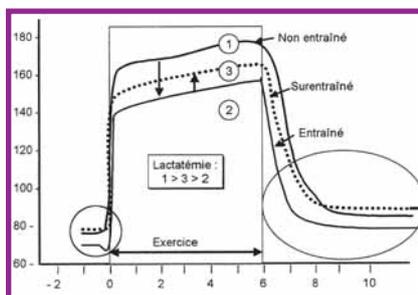


Figure 6 : Le test de Costill : soit à partir d'une distance connue, à une FC fixe (noter alors la baisse du temps de réalisation), soit sur une durée fixe (noter alors la différence de fréquence sollicitée).

réalisation régulière d'un *polar fitness test*, durant lequel la FC de repos et la variabilité de la FC seront mesurées. De plus, il est clairement admis que le seul paramètre "VO₂max" ne peut résumer l'indice "forme" ou l'indice "performance" d'un sujet.

Enfin, il est un moyen beaucoup plus simple de juger l'efficacité d'un programme de réadaptation ou d'entraînement sportif tel que le test de Costill (Fig. 6). En effet, ce test consiste en la réalisation régulière (toutes les 3 semaines environ) d'une "course" sur une distance connue, dans les mêmes conditions et dans la même zone cible. La réduction du temps d'activité traduit fort logiquement l'amélioration de la performance et donc, de la condition physique. Ce test permet aussi, de manière très simple, de dépister une fatigue ou un début de surentraînement.

• Le calcul de la zone idéale de travail

La détermination de cette "zone cible" est basée sur la variabilité de la FC (intervalle de temps entre deux pulsations). Cette dernière, maximale au repos, diminue à l'effort. Néanmoins, à partir d'une certaine intensité d'exercice, il existe un "plateau de baisse de la variabilité", celle-ci restant ensuite stable jusqu'au niveau d'effort correspondant à VO₂max.

En 1996, Tulppo a confirmé que la méthode "du point de Poincaré" pouvait être utilisée comme une méthode d'analyse fiable de la variabilité de la FC pendant l'activité physique (Fig. 7). Les tests comparatifs ont montré une bonne fiabilité des CFM (proposant cette fonction) dans la détermination de la FC cible correspondant au début du plateau. Dans les différentes études, ce plateau est retrouvé en moyenne à 55 % de la VO₂max, c'est-à-dire à environ 60 % de la FCmax.

Cette détermination impose, là aussi, la contrainte d'un test préliminaire à chaque séance d'entraînement. Par ailleurs, il existe une variabilité de cette "zone idéale" en fonction de l'âge, du moment de la journée, de l'état de stress ou de fatigue. Enfin, dans un nombre non négligeable de cas, le test de détermination échoue et l'appareil détermine alors automatiquement une zone basée sur un pourcentage de la FCmax, calculée à partir de la formule : 220 - âge ! La limite supérieure de cette zone cible est fixée tout à fait arbitrairement par les appareils à + 30 bat/min par rapport à la valeur basse calculée ! Bien que cette approche permette de diminuer la variabilité à "court terme" de la valeur absolue de la FC pour une intensité d'effort fixée (en valeur absolue et non en pourcentage de la FCmax), elle ne présente un intérêt réel que pour les séances d'entraînement à faible intensité (en dessous du 1^{er} seuil) et son apport est très restreint chez le sportif.

• L'estimation de la FCmax

Certains appareils proposent cette

fonction. Le calcul est réalisé en intégrant l'âge, le sexe, le poids, la variabilité de la FC (calculée sur plus de 200 battements cardiaques), ainsi que la VO₂max estimée !

Une étude récente réalisée par une marque finlandaise chez 431 sujets a comparé les résultats obtenus par leurs appareils avec les FCmax mesurées lors d'un test d'effort. Les résultats (Tab. 1) montrent que dans l'estimation du CFM, l'erreur principale absolue (7 bpm), ainsi que la déviation standard (8 bpm) sont inférieures à celles obtenues avec la formule d'Astrand, basée sur l'âge (11). Cette fonction peut donc présenter un intérêt en début d'utilisation du CFM, avant tout test d'évaluation. En aucun cas elle ne doit dispenser de ce test, surtout chez le cardiaque à réadapter.

• La fonction mémoire

Elle permet d'enregistrer un certain nombre de fichiers (environ une vingtaine). Sur certains modèles, l'interfaçage avec un ordinateur permet d'enregistrer les données en fichier pour les comparer ensuite.

Les fonctions "supérieures"

Elles se trouvent sur les appareils "haut de gamme". Hormis une grande capacité de stockage des données en mémoire, un transfert IR sur PC, une possibilité d'analyse des données sur un logiciel spécifique livré avec l'appareil, la principale qualité de ces modèles réside surtout dans la fourniture d'un 3^e élément : le capteur de vitesse.

• Le capteur de vitesse

Il fonctionne soit par l'intermédiaire

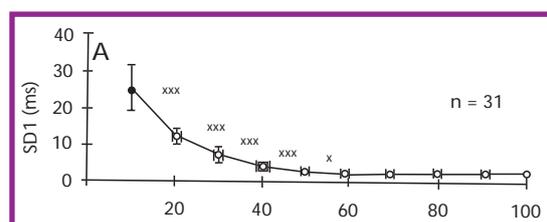


Figure 7 : La variabilité sinusale maximale au repos décroît ensuite à l'effort, pour devenir pratiquement nulle à partir de 50 % de la VO₂max.

d'un système GPS, dont le principal inconvénient réside dans la limite de réception dans les zones urbaines et surtout, dans les parcours réalisés en sous bois ; soit par le biais d'un accéléromètre, qui ne présente donc pas cette limitation.

« Mesure de l'accélération plus de 1 000 fois par seconde à chaque foulée », selon le fabricant. Mais en pratique, la marge d'erreur est d'environ 5 à 10 % selon les variations d'allure de course (Tab. 2). Cet accéléromètre se fixe aisément à la chaussure et représente un encombrement et un poids plus réduit que le système GPS.

Ces capteurs représentent un atout supplémentaire indiscutable, permettant de s'affranchir d'un parcours borné et kilométré et apportant une information en "temps réel", bien utile (distance réalisée, allure et vitesse instantanée).

Certains modèles "cyclisme" proposent des capteurs de puissance fixés sur le vélo. Ils sont associés à un capteur de cadence et de vitesse, la précision de cette mesure étant correcte ($\pm 10\%$).

● L'indicateur de surentraînement

L'indicateur de surentraînement est proposé sur le très haut de gamme et basé sur l'analyse de la variabilité de la FC. La validation de cet indice est néanmoins très controversée dans la littérature (11). Cette fonction est donc très secondaire : à mon avis, le test de Costill cité plus haut est tout aussi intéressant à réaliser dans ce but et accessible avec n'importe quel modèle de base !

La liste des fonctions proposées sur ces modèles s'enrichit tous les jours. Il est donc impossible de les passer toutes en revue et nous avons cité les propriétés les plus intéressantes.

> Le CFM "idéal"

Avant toute chose, il se doit d'être d'un abord simple. Trop souvent, les modes d'emploi sont complexes, les termes utilisés trop techniques et les appareils sous-utilisés, voire délaissés. Dans un objectif "médical" de reconditionnement physique, la priorité restera la simplicité d'utilisation, avec une facilité d'accès à la programmation et au contrôle de la FC d'entraînement. Parmi les options, j'opterais pour le recueil des calories dépensées (le minimum hebdomadaire à réaliser étant de 2 000 Kcal dans toutes les études) et, éventuellement, le calcul de la "zone idéale", tout en privilégiant les "zones cibles" déterminées à l'occasion du test d'évaluation médical. Par contre, un capteur de vitesse devrait être inclus sur des modèles abordables, quitte à les délester de certaines fonctions plus secondaires. Dans un objectif "compétition", la simplicité est toujours de mise : le capteur de vitesse, la fonction *interval training* (pour les séances de 30/30), 3 zones programmables et pour les férus d'informatique, un modèle spécifique avec la possibilité de transfert des données par *bluetooth* ou interface USB.

Bien sûr, dans tout les cas, plutôt que de sophistication à outrance les modèles, les fabricants devraient essayer d'améliorer la technique de réception (miniaturisation du récepteur, électrodes autocollantes réutilisables ?).

> En conclusion

La pratique d'une activité physique est devenue une nécessité, dans une société qui ne cesse de se sédentariser par la faute de l'omniprésence de la voiture.

Toutes les sociétés savantes vantent les bienfaits de la pratique sportive, aussi bien en prévention primaire, notamment chez les sujets déconditionnés, pléthoriques ou simplement stressés, qu'en prévention secondaire, chez les coronariens.

La réadaptation en centre permet une réduction significative de la mortalité et de la morbidité cardiovasculaire. Tous les programmes insistent donc sur la nécessité absolue de la poursuite d'une activité physique régulière à la sortie et c'est bien là que le problème se pose, car souvent, sa prescription est trop vaguement proposée et très empiriquement élaborée : « Aller marcher une demi-heure par jour »... Il existe vraiment un paradoxe entre, par exemple, la précision de la traque du LDL-cholestérol à 0,10 g/l près et le flou artistique des recommandations sur la "charge d'entraînement efficace".

Cet empirisme a d'ailleurs été largement mis en évidence dans la récente

Tableau 1 : Comparaison de la méthode "polar" et de la formule d'Astrand pour calculer la FCmax d'un sujet.

Méthode	Erreur principale absolue (bpm)	Erreur principale absolue (%)	Déviations standard (bpm)	Erreur < ± 5 bpm (% de sujets)	Erreur < ± 14 bpm (% de sujets)
Méthode "Polar"	6,5	3,5	7,9	43	93
Formule d'Astrand : 220 - âge	7,6	4,1	9,4	41	81

D'après Hannula et al. ECSS 2000.

Tableau 2 : Fiche de route d'un coureur équipé d'un CFM et d'un capteur de vitesse (polar 200 sd) sur un semi-marathon "officiel" ; la marge d'erreur reste inférieure à 50 m/km.

	Kilométrage	Temps de passage au km, en min. et s.	Remarques
1	0,95	5,34	Le capteur S1 n'a été activé qu'après 50 m de course
2	1,01	5,3	
3	2	10,47	Le panneau km 3 n'a pas été vu
4	1,98	10,43	Le panneau km 5 n'a pas été vu
5	1	5,28	
6	0,98	5,14	
7	1	5,34	
8	0,98	5,26	
9	1	5,29	
10	0,97	5,18	
11	0,93	5,07	Le panneau km 13 n'était pas à sa place
12	1,02	5,56	Le panneau km 14 récupère le retard du 13 ^e
13	1	5,2	
14	1,2	5,22	
15	0,99	5,13	
16	0,99	5,1	
17	1	4,59	
18	0,98	4,3	
19	1,11	4,59	Incluant les 150 m de l'arrivée

méta-analyse réalisée par Taylor (13) sur les effets bénéfiques des programmes de réadaptation. L'auteur déplore le manque de standardisation des programmes de reconditionnement et la grande disparité dans le niveau d'intensité des séances proposées (entre 60 et 90 % de la FCmax), dans les différentes études recensées.

La multiplication des centres de réentraînement "ambulatoires" va certainement permettre d'obtenir une meilleure observance dans le "main-

tien de l'acquis", néanmoins, ces centres ne sont pas accessibles à tous, à cause d'une indiscutable contrainte géographique et de disponibilité.

Pour ces différentes raisons, le CFM, par sa simplicité d'utilisation, voit s'ouvrir devant lui un large champ d'utilisation : il permet à chacun de gérer son "programme d'entretien", en toute liberté, tout en étant sécurisé par le contrôle de la FC. L'amélioration de l'efficacité et des résultats de son utilisation viendra d'une meilleure connaissance du produit de la part

des prescripteurs et des utilisateurs. Seule une bonne collaboration entre le milieu médico-sportif et les fabricants permettra de sélectionner une population de véritables utilisateurs à bon escient de cet appareil. ■

MOTS CLÉS

Cardiofréquencemètre, entraînement, sportif, fréquence cardiaque, VO₂max, étalonnage, performances

Bibliographie

- Zavorsky GS. Evidence and possible mechanisms of altered maximum heart rate with endurance training. *Sports Med* 2000 ; 29 : 13-21.
- Lambert MI. Heart rate training and competition for long distance running. *J Sports Sci* 1998 ; 16 : 585-90.
- Noakes T. *Lore of running*. Human Kinetics. USA : Oxford University Press, 2001.
- Meyer K, Hajric R, Westbrook S et al. Ventilatory and lactate threshold determinations in healthy normals and cardiac patients: methodological problems. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1996 ; 72 : 387-93.
- Prefaut C. Les seuils ventilatoires : méthode non invasive d'estimation des seuils lactiques. *Science et Sports* 1993 ; 8 : 217-20.
- Boudet G, Albuissou E, Bedu M, Chamoux A. Heart running speed relationships during exhaustive bouts in the laboratory. *Can J Appl Physiol* 2004 ; 29 : 731-42.
- Hills AP. Submaximal markers of exercise intensity. *J Sports Sci* 1998 ; 16 : 871-6.
- Laporte T. VO₂max et marathon. *Sport Med* 1996 ; 86 : 6-12.
- Gilman MB. The use of heart rate to monitor the intensity of endurance training. *Sports Med* 1996 ; 21 : 73-9.
- Achten J, Jeukendrup AE. Heart rate monitors : applications and limitations. *Sports Med* 2003 ; 33 : 517-38.
- Raija MT. Heart rate monitors : state of the art. *JSci* 1998 ; 16 : S3-S7.
- Achten J, Jeukendrup AE. Heart Rate monitoring : applications and limitations. *Sports Med* 2003 ; 33 : 517-38.
- Taylor RS, Brown A, Ebrahim S et al. Exercise-based rehabilitation for patients with coronary heart disease : systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Am J Med* 2004 ; 116 : 682-92.