

Cardiofréquencemètre avec ceinture et cardiofréquencemètre “tout-en-un”

Lequel choisir ?

Depuis la sortie du premier modèle en 1983, le cardiofréquencemètre (CFM), grâce à son système d'acquisition fiable et facile de la fréquence cardiaque (FC), a rendu plus précise et plus physiologique la pratique des sports d'endurance pour tout un chacun.

Dr Thierry Laporte*

ÉVOLUTION DES APPAREILS

Les appareils dits traditionnels sont constitués d'un émetteur, une classique ceinture pectorale équipée de deux électrodes souples qui recueillent les battements cardiaques. Ceux-ci sont comptabilisés au niveau d'un émetteur central fonctionnant avec une pile au lithium. Cet émetteur envoie les informations par une émission radiocodée sur une certaine onde de fréquence à un récepteur intégré dans une montre, qui va ensuite convertir en numérique, afficher et mémoriser les valeurs. Ce récepteur peut aussi être détaché et positionné par exemple sur le guidon d'un vélo pour une meilleure visualisation des données par le cycliste.

Progressivement, les systèmes se sont miniaturisés et adaptés pour une meilleure facilité d'utilisation. Les valeurs de FC, qui étaient réactualisées toutes les 15 secondes, s'affichent actuellement en instantané battement par battement. Les complexes sinusaux et les extrasystoles sont comptabilisés, permettant de dépister des troubles du rythme (syndrome du cardiofréquencemètre) qui auraient pu passer inaperçus sans le

port du CFM. Par ailleurs, les récepteurs peuvent se confondre avec des montres classiques et les fonctions associées se sont multipliées, intégrant, pour les hauts de gamme un GPS et/ou un tracker d'activité (couple accéléromètre + gyroscope, pour quantifier la durée, l'intensité et parfois la nature de l'activité physique).

Plusieurs études comparatives ont montré, sous réserve d'un bon positionnement de la ceinture pectorale, une parfaite fiabilité des mesures de la FC avec une corrélation parfaite ($r = 0,97$) avec les données d'un signal ECG et une stabilité dans le temps des données recueillies. Ainsi, certains appareils proposent une analyse de la variabilité de la FC sinusale permettant d'extrapoler un indice de forme et d'estimer la valeur du VO_2 max de l'utilisateur!

Néanmoins, ces appareils présentent quelques limites d'utilisation. Le codage des ondes émises a permis d'éviter les interférences entre plusieurs CFM utilisés par un groupe de personnes. L'autre limite est fonctionnelle. Il s'agit du désagrément provoqué par le port de la ceinture pectorale, surtout chez les femmes, et ce malgré l'apparition de modèles de soutiens-gorge avec capteurs intégrés dans l'armature.

Depuis quelques années, avec l'essor et la mode des montres connectées, sont apparus des modèles autonomes proposant un affichage de la FC en temps réel grâce à un émetteur/récepteur intégré dans la montre, d'où la dénomination de CFM “tout-en-un” qui évite la contrainte du port d'une ceinture pectorale. Initialement limité aux modèles destinés au grand public, ce type de CFM commence à être proposé pour l'entraînement des sportifs (de haut niveau?).

Le principe de la mesure de la FC au poignet est celui de la photopléthysmographie (PPG) optique permettant de déceler les variations de débit sanguin dans les tissus (**Fig. 1**). Des voyants verts associés à des photodiodes sensibles à la lumière permettent, en s'activant tous les centièmes de secondes, de détecter le débit sanguin et sa variation en fonction de l'intensité de l'effort. À chaque systole, le flux sanguin, et donc le taux d'absorption de la lumière verte, augmente et inversement en diastole.

Le capteur optique intégré calcule la quantité de lumière renvoyée. C'est de cette mesure, épurée des variations dues aux mouvements du bras, que la montre déduit la FC en continu. Il s'agit donc d'une mesure des changements de volume sanguin dans les

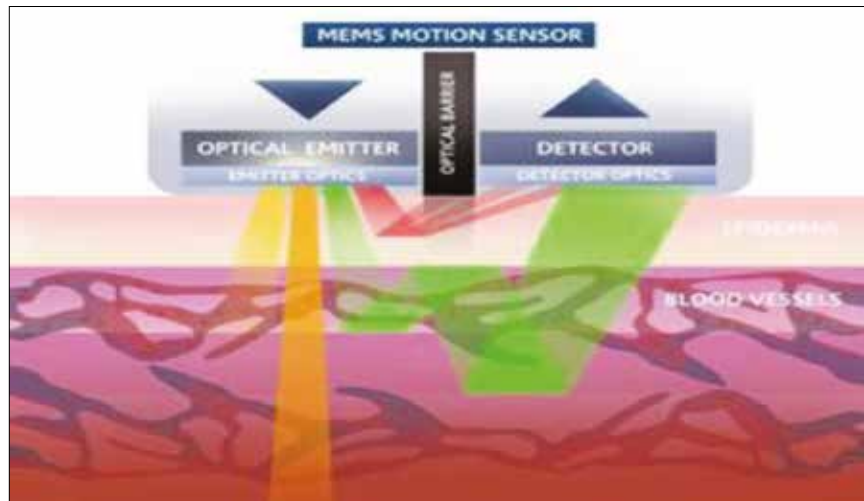
*Unité médicale de l'activité physique et sportive, hôpital Bagatelle, Talence

tissus et non du calcul de la fréquence de passage de l'ondée sanguine à chaque systole. Les légères variations du rythme de la pression sanguine à travers le poignet sont détectées par le capteur qui utilise un processus de filtrage sophistiqué pour déterminer la FC avec fiabilité. Et pour plus de précision, certains fabricants ajoutent des artifices, tels qu'une membrane en silicone placée au dos de la montre afin de bloquer la lumière ambiante susceptible de fausser les mesures.

Devant l'avalanche des nouveaux modèles de CFM "tout-en-un" et le peu de travaux scientifiques publiés sur leur qualité, nous avons réalisé une étude comparative. L'objectif de notre étude était de comparer les valeurs de FC mesurées à l'effort par CFM classique et CFM "tout-en-un".

MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

Cette étude prospective a été menée de juin 2015 à avril 2016. La mesure instantanée de la FC a été analysée lors d'une épreuve rectangulaire à intensité constante et durable. La reproductibilité de la mesure et l'adaptation des appareils aux différentes conditions environnementales, notamment à l'extérieur "sur le terrain", ont aussi été étudiées. Cinq modèles ont été sélectionnés, provenant de trois marques dites "premium" : un CFM traditionnel qui a servi d'étalon pour les essais comparatifs sur le terrain et 4 CFM "tout-en-un", dont deux de première génération équipés du capteur "MIO" et deux équipés de capteurs "maison" mis au point par les deux marques leaders sur le marché actuellement. Nous avons pu réaliser 126 mesures comparatives en laboratoire à l'occasion d'un test d'effort, dont 85 sur cycloergomètre. Pour tous ces tests, la température ambiante était de 21 °C et l'éclairage lumineux constant et identique. Les FC obtenues étaient comparées à



>>> Figure 1 - Schéma illustrant la méthode de mesure de la fréquence cardiaque avec les CFM "tout-en-un".



>>> Figure 2 - Exemple de test comparatif avec un CFM "tout-en-un" sur chaque poignet et un signal ECG en direct. Les deux CFM sont de la même marque, mais équipés l'un d'un capteur MIO et l'autre d'un capteur "maison".

celles rapportées simultanément par un ECG sur 15 dérives (Fig. 2).

Les autres tests ont été effectués sur tapis roulant en utilisant des protocoles "vitesse sans pente", donc avec une grande amplitude d'oscillation antéropostérieure des bras, avec le même principe de mesures comparatives et en inversant d'un test à l'autre les CFM d'un poignet à l'autre.

Les tests menés à l'extérieur ont été réalisés par le même expérimentateur, soit sur un tapis roulant à l'air libre sous abri, soit sur un circuit pédestre en sous-bois ou sur une piste cyclable (course à pied, marche nordique, randonnée pédestre de longue durée). Notre testeur était équipé du CFM traditionnel et, comme en laboratoire, d'un CFM "tout-en-un" au

niveau de chaque poignet. Vu la durée de l'étude (10 mois), trois saisons ont été traversées avec des conditions climatiques variées (température extérieure allant de 5 à 25 °C).

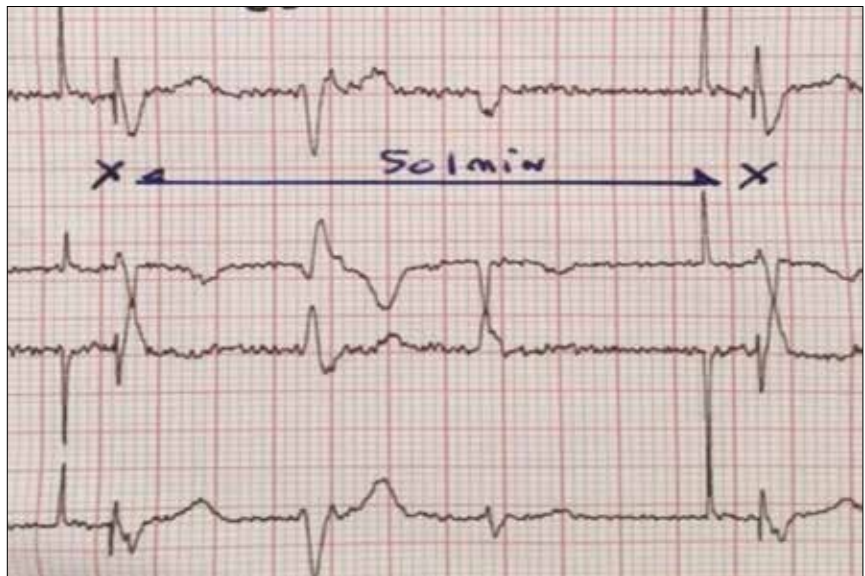
RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

TESTS DE LABORATOIRE

Sur cycloergomètre, une corrélation parfaite entre les valeurs de FC sur les CFM "tout-en-un" et l'ECG a été observée dans 80 % des cas. À noter que sur les CFM "tout-en-un", l'acquisition de la FC est quasi instantanée (quelques secondes) et au moins aussi rapide que pour le signal ECG ! Dans ces cas, l'écart entre les FC a été ≤ 2 à 3 bpm à l'effort ou en récupération. Dans 20 % des cas, les résultats ne furent pas satisfaisants avec un écart de mesure ≥ 20 bpm, le plus souvent sur la deuxième moitié du test.

Nous avons analysé ces résultats discordants pour essayer d'en comprendre la raison. Sur les cinq patients de couleur noire, nous n'avons eu qu'un seul échec de mesure. Dans les quatre autres cas, le recueil était parfait, sans différence par rapport au groupe de peau claire ou bronzée. Nous n'avons noté aucune différence de qualité des mesures selon le degré de pilosité et la taille du poignet – à condition de veiller au bon serrage du bracelet, surtout sur les poignets fins et en cas de sudation importante pour éviter au bracelet de se décaler et de risquer de mettre en contact les LED lumineuses avec la saillie du cubitus ou du radius. Enfin, et cela est plus étonnant, aucune différence de qualité de recueil n'a été observée selon le degré de sudation de la peau.

Deux causes principales ont été identifiées pour expliquer les 12 examens non concluants. Dans six cas, il s'agit d'une cause mécanique et fonctionnelle, avec un décrochage des valeurs de FC, le plus souvent sur les derniers paliers lorsque les sujets s'agrippaient sur leur guidon mettant ainsi en ten-



>>> Figure 3 - Enregistrement simultané de FC par ECG et par un CFM « tout-en-un » (50 bpm), le CFM ne prenant pas en compte les ESV.

sion les muscles de l'avant-bras, avec en plus une attitude d'hyperflexion en arrière du poignet. Dans tous ces cas, dès l'arrêt de l'effort, avec le fait de lâcher le guidon, le recueil des valeurs de FC redevenait fiable. Il s'agit là indiscutablement d'une limite logique de la technique de mesure. Les troubles du rythme qui ont été observés chez quatre autres sujets sont indiscutablement plus limitants. Dans deux cas, il s'agissait de salves d'ESV occultées par les montres. Le troisième sujet a présenté un épisode de 30 secondes de fibrillation atriale, avec décrochage immédiat du CFM (30 bpm < ECG) et synchronisation parfaite dès le retour en rythme sinusal. Le dernier cas, plus insolite, concerne un patient porteur d'un pacemaker double chambre réglé à 65/min et qui est revenu en consultation, inquiet de constater que sa montre affichait régulièrement 50 bpm. L'enregistrement simultané de l'ECG retrouvait de nombreuses ESV qui recyclaient logiquement le pacemaker. Ces ESV n'étant pas reconnues par le système de photopléthysmographie, la montre affichait donc la fréquence des complexes ventriculaires stimulés, d'où une différence de



>>> Cardiofréquencemètre avec capteur optique deuxième génération.

15 battements entre la valeur du signal ECG et celle du capteur au poignet (Fig. 3)!

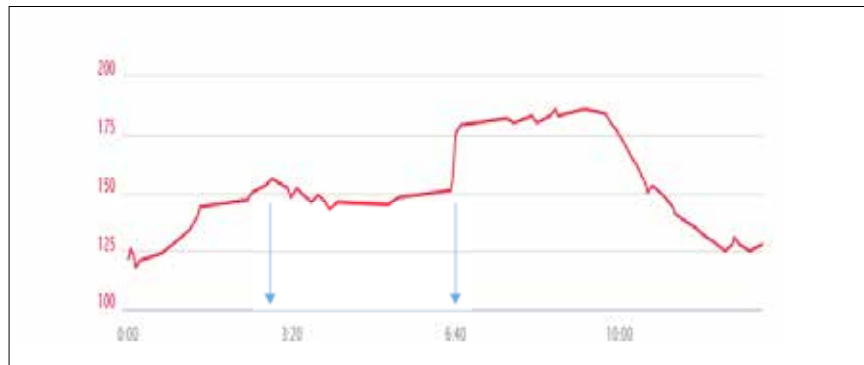
Enfin, dans les trois derniers cas, nous n'avons obtenu aucun recueil fiable de la part du CFM sans qu'aucune raison logique et identifiable ne soit retenue, et ce même en changeant la montre de côté ou en réajustant le position-

nement de la montre sur l'avant-bras! Sur tapis roulant, les comparaisons ont abouti à des résultats moins flatteurs avec 60 % de réussite complète. Elle est incomplète, mais acceptable dans 70 à 75 % des cas. La mobilisation de grande amplitude des bras est souvent en cause. Dans un cas, l'échec est expliqué par un syndrome de Raynaud avec vasoconstriction périphérique paradoxale à l'effort. Enfin, dans plusieurs cas, nous avons observé des décrochages temporaires de la FC après un début d'analyse correct, comme si le système d'analyse avait des interruptions temporaires (Fig. 4).

TESTS DE TERRAIN

Les résultats des essais comparatifs sur le terrain, les plus intéressants pour la pratique quotidienne, sont moins bons qu'en laboratoire.

Deux limites importantes d'utilisation des CFM "tout-en-un" ont été observées. D'une part, le délai d'affichage des valeurs de la FC dépend à la fois du système de PPG utilisé (première ou deuxième génération), mais surtout des conditions de température extérieure. L'acquisition est toujours bien plus rapide avec un CFM traditionnel (10 secondes maximum et ce, quelle que soit la température ambiante). De plus, à condition climatique égale, les CFM "tout-en-un", équipés du système MIO, affichent plus vite la FC que ceux avec les systèmes d'analyse de deuxième génération! Cette constatation reste certainement à reconsidérer sur un échantillon plus important, mais dans le meilleur des cas (température de 20 °C), le délai d'acquisition reste plus important avec les CFM "tout-en-un". Il devient beaucoup trop long en période hivernale où nous avons noté des latences proches de 15 minutes pour des températures < 10 °C, ce qui est très préjudiciable pour une séance de quelques dizaines de minutes seulement. D'autre part, à vitesse



>>> Figure 4 - Courbe de fréquence cardiaque enregistrée sur tapis roulant à allure constante pendant 10 minutes. La mesure s'interrompt brutalement (entre les deux flèches) avec récupération spontanée de la mesure. Aucune autre explication qu'une défection du système de recueil du CFM n'a été retrouvée.



>>> Figure 5 - Séance de course à pied à vitesse stable (37 min) en sous-bois (15 °C). Haut : en bleu vitesse (min/km), en rouge fréquence cardiaque (FC) avec un CFM avec ceinture (variabilité < 5 bpm). Bas : recueil simultané de la FC avec un CFM "tout-en-un" avec écart majeur parfois des valeurs (cf. 15^e minute, variation proche de 20 bpm).

constante, nous avons observé une différence des FC affichées par le CFM "tout-en-un", parfois > 15 bpm, par rapport aux valeurs du CFM ceinture (Fig. 5 et 6).

Deux autres limitations d'utilisation moins gênantes des CFM "tout-en-un" ont aussi été notées. Lors de la marche nordique, l'utilisation des bâtons perturbe beaucoup la mesure de la FC. La consommation d'énergie est plus importante, donc la durée d'utilisation de la batterie des montres est

plus courte avec les CFM "tout-en-un" qu'avec les CFM classiques.

COMMENTAIRES

La littérature scientifique sur le sujet est encore assez pauvre. Nous observons une moins bonne corrélation entre ECG et CFM "tout-en-un" que dans deux études réalisées par la même équipe (1, 2), semblables dans leur approche à la nôtre (n = 25 personnes). Moins scientifiques, mais

aussi importantes pour le consommateur éventuel, les réserves qui découlent de nos résultats commencent à apparaître sur les forums de coureurs et de cyclisme.

Sur le plan médical, le syndrome du cardiofréquence-mètre risque de perdre de sa sensibilité et de sa spécificité compte tenu de la difficulté à comptabiliser les battements ectopiques et les variations imprévisibles et fréquents de la FC. Les concepteurs de ces appareils n'expliquent pas ces variations et recommandent seulement d'effectuer des mises à jour fréquentes du système PPG des CFM "tout-en-un"...

Pour la pratique courante, nous n'avons retrouvé aucune limitation liée à la couleur de la peau ou au degré de sudation, contrairement à ce qui est signalé par les marques. La montre doit être positionnée au moins deux travers de doigt au-dessus du poignet et son serrage doit être suffisant pour éviter un déplacement des LED lumineuses vers les reliefs osseux. En cyclisme, une forte contraction des muscles de l'avant-bras sur le guidon peut entraîner un certain degré de vasoconstriction ou d'écrasement au niveau de la microcirculation sanguine et fausser la précision des mesures par PPG. Ce phénomène mériterait d'être étudié chez des pratiquants de VTT. Il est possible qu'il existe des "non-répondeurs" (environ 10 %) à la technique de mesure optique, comme nos tests sur tapis roulant l'ont montré. Les meilleurs résultats observés à l'intérieur peuvent s'expliquer pour une part par l'environnement lumineux constant en laboratoire par rapport aux essais en nature. La limitation liée à la température ambiante a déjà été rapportée dans la littérature. Enfin, certaines activités comme la marche nordique, pourraient limiter l'utilisation de ces appareils, mais cela mérite confirmation sur une plus grande population.



>>> Figure 6 - Comparaison des évolutions de la fréquence cardiaque (FC) relevées simultanément sur un CFM ceinture (en haut) et deux CFM "tout-en-un", nouvelle (au milieu) et ancienne (en bas) génération chez un sujet qui court (20 min) sur un tapis roulant sur une terrasse extérieure avec une température de 7-8 °C. Outre les variations brutales et inexpliquées des FC, noter l'inertie d'acquisition de la FC avec les CFM "tout-en-un" (variabilité plus marquée avec appareil ancienne génération).

EN PRATIQUE, QUE RETENIR ET QUE PROPOSER ?

La FC est un moyen très fiable et très précis pour contrôler l'intensité relative d'une activité physique et sportive d'endurance. Les modèles classiques de CFM ont prouvé leur précision dans le recueil de la FC, mais aussi leur fiabilité dans la durée, et ce, quelles que soient les conditions de pratique. Selon nos résultats, les modèles "tout-en-un" ne peuvent à l'heure actuelle revendiquer de tels atouts.

Nous allons être confrontés de plus en plus souvent à cette question du choix de la part de nos sportifs, mais aussi de personnes en quête de pratique d'activité physique "sur ordonnance".

Pour les patients, *a fortiori* cardiaques, le manque total de sensibilité et de spécificité des CFM "tout-en-un" dans la détection des troubles du rythme doit nous inciter à prescrire l'utilisation d'un CFM traditionnel.

Pour les sportifs, le débat est plus ouvert et plusieurs cas de figure peuvent être envisagés. Un CFM "tout-en-un" peut être proposé pour une personne, *a fortiori* une femme (plus réfractaire au port d'une ceinture pectorale), après un essai préalable, pour être certain de faire partie des sujets répondeurs, pour une activité principale en salle de sport sur des pratiques de cardio-training sur vélo, tapis roulant, voire vélo elliptique

(activité non testée et qui mérite des réserves liées au mouvement des bras et à la tension des avant-bras). Il faudra prévenir la personne du risque de limitation de la qualité du recueil lors de la pratique physique en extérieur. Pour le coureur à pied ou le cycliste qui s'entraîne majoritairement en nature et notamment en période hivernale, le CFM avec ceinture reste jusqu'à preuve du contraire le choix raisonnable, efficace et sécurisant. Ceci, en attendant avec impatience des modèles "tout-en-un" de troisième génération qui auront gommé les défauts des premiers modèles.


Mais le choix va aussi et souvent principalement se faire en fonction du budget que chacun veut consacrer à l'achat d'un CFM. Pour un investissement de moins de 200 euros, il faut aujourd'hui sans hésiter opter pour un modèle traditionnel avec ceinture et de marque premium avec un GPS fiable intégré et une possibilité d'enregistrer les séances sur son ordinateur. Pour un budget entre 350 et 500 euros, on peut opter pour un modèle "tout-en-un" de marque premium, utilisant de préférence le système de PPG "MIO", et pour quelques dizaines d'euros supplémentaires, investir aussi dans une ceinture pectorale, car ces CFM intègrent aussi la possibilité du recueil de la FC par radiofréquence! Ce qui permettra à son utilisateur de pallier, notamment l'hiver, les limites de la mesure par la PPG.



>>> Une véritable smartwatch Android optimisée pour le sport avec GPS et cardiofréquencemètre intégrés.

CONCLUSION

Le contrôle de l'intensité d'une activité physique par la FC doit rester la méthode de référence. Il faut donc éviter que les nouveaux CFM apportent un injuste discrédit sur cette méthode de contrôle. L'idéal est donc de combiner au sein d'un même appareil les deux techniques de recueil de la FC, laissant le choix à l'utilisateur de la méthode de recueil en fonction du type d'activité et des conditions environnementales. L'écueil devient alors

surtout financier et il faut souhaiter que des efforts soient faits par les marques pour proposer ce CFM idéal à un prix abordable pour tous. 

MOTS-CLÉS

Cardiofréquencemètre, Ceinture, "Tout-en-un", Fréquence cardiaque

BIBLIOGRAPHIE

1. Parak J, Korthonen I. Evaluation of wearable consumer heart rate monitors based on photoplethysmography. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc 2014 : 3670-3.

2. Delgado R, Parak J. Evaluation of accuracy and reliability of pulse on optical heart rate monitoring device. Proc IEEE Eng Med Biol Soc 2015 : 430-3.