

TEST D'EFFORT

MISE AU POINT SUR UN EXAMEN ESSENTIEL

1 Les modalités d'exploration à l'exercice : sont-elles toutes identiques ?

Dr Stéphane Doutréleau (Service de Physiologie, UM Sports et Pathologies, CHU de Grenoble)

2 Sportif asymptotique, épreuve d'effort douteuse... : que faire ?

Dr Laurent Chevalier (Unité Cardiologie du Sport, Clinique du Sport de Bordeaux-Mérignac)

3 La récupération après l'épreuve d'effort : importance de l'analyse des paramètres

Dr Jean-Yves Tabet (Service de cardiologie de l'hôpital Lariboisière, Centre de réadaptation cardiaque des Grands Prés, Villeneuve-Saint-Denis), Dr Philippe Meurin (Centre de réadaptation cardiaque des Grands Prés, Villeneuve-Saint-Denis), Dr Ahmed Ben Driss (Centre de réadaptation cardiaque des Grands Prés, Villeneuve-Saint-Denis)

4 Place des tests de terrain : un outil de choix pour certains sportifs

Dr Thierry Laporte (Cardiologie, Bordeaux)

MOTS-CLÉS :

Test d'effort, Tapis roulant, Bicyclette ergométrique, Intensité, Fréquence cardiaque, Arythmie, Repolarisation, Dépistage systématique, Récupération, Analyse des échanges gazeux, Sous-décalage ST, Test de terrain, VO_2 , Test rectangulaire, Test triangulaire, FC max, VMA, PMA



© technotr - iStock

INTRODUCTION

L'épreuve d'effort reste un examen essentiel en cardiologie générale. Elle permet en fait d'explorer les capacités d'adaptation de l'organisme. Élément tellement important que la capacité physique explorée par l'épreuve d'effort est actuellement le meilleur marqueur indépendant des facteurs de risque et des maladies associées de l'espérance de vie individuelle. Le cardiologue connaît très bien les épreuves d'effort réalisées chez les patients. Sa réalisation et son interprétation chez le sportif n'ont

plus de secrets pour le cardiologue. Sans oublier l'intérêt des tests d'effort de terrain très en vogue dans le monde sportif, mais souvent mal réalisés et/ou interprétés. Enfin, l'intérêt de l'analyse des paramètres de récupération de l'épreuve d'effort est trop souvent sous-estimé. Ce dossier va donc répondre à toutes ces questions que vous vous posez.

Pr François Carré (Hôpital Pontchaillou, Rennes)

1

Les modalités d'exploration à l'exercice

Sont-elles toutes identiques ?

Dr Stéphane Doutreleau*

L'épreuve fonctionnelle d'exercice (EFx) s'impose de plus en plus comme un examen incontournable de la pratique cardiologique et même médicale au sens large du terme. En explorant de façon intégrée tous les systèmes mis en jeu à l'effort, elle apporte des informations fonctionnelles diagnostiques et pronostiques d'une importance inégalée. Que l'épreuve soit réalisée avec ou sans mesure des échanges gazeux, la multiplication des indications et des possibilités d'exploration doit amener le praticien à s'interroger sur le choix de l'ergomètre, du protocole d'exercice et sur la construction du protocole d'exploration. La pratique de l'exploration à l'effort tient encore souvent trop des habitudes acquises, de gain de temps ou de la tradition, alors que les résultats peuvent être influencés par nos pratiques. Cet article se propose de faire le point sur l'influence de différents paramètres et de différentes pratiques sur les résultats des explorations à l'effort, pour optimiser nos pratiques.

PARAMÈTRES MODULABLES DE L'EXERCICE MUSCULAIRE

À l'effort, l'augmentation de la demande métabolique musculaire (oxygène et nutriments) impose au sujet de développer une stratégie optimale pour y répondre, en augmen-

tant les apports. Celle-ci peut différer de l'adaptation classique (considérée comme normale) parce qu'il existe un ou plusieurs facteurs limitants, mais aussi parce que les sujets que l'on évalue sont d'âge et/ou de capacités physiques différents.

Les épreuves d'exercice sont modulables et on peut ainsi utiliser différents types d'ergomètres, construire différents modes d'exercice et/ou faire varier différents paramètres :

- **l'intensité** (puissance sur le vélo ou vitesse et pente sur le tapis roulant) ;
- **la durée des paliers** ;
- **la fréquence du mouvement** (fréquence de pédalage ou fréquence des foulées).

Comment ces paramètres influencent-ils les résultats et quelles peuvent être les conséquences pratiques pour l'exploration des patients et des sportifs porteurs de divers handicaps ?

LE CHOIX DE L'ERGOMÈTRE INFLUENCE-T-IL LES RÉSULTATS DE L'ÉPREUVE D'EFFORT ?

LA RÉPONSE CARDIOVASCULAIRE DÉPEND DU TYPE D'EXERCICE

La réponse cardioventilatoire à l'exercice dépend du volume des masses musculaires mobilisées et donc du type d'exercice réalisé. En dehors de certains ergomètres spécialisés employés en médecine du sport, les deux principaux ergo-

mètres utilisés en pratique quotidienne sont le **tapis roulant** (surtout en Amérique du Nord) et la **bicyclette ergométrique** (surtout en Europe). Lorsque les deux ergomètres sont disponibles, on choisira le plus adapté au patient ou au sportif. L'utilisation de tel ou tel type d'ergomètre a des avantages et des inconvénients.

LES AVANTAGES

DE LA BICYCLETTE ERGOMÉTRIQUE

L'exploration sur vélo apporte une plus grande stabilité de l'ECG (et donc une facilité d'interprétation meilleure), une mesure plus facile de la pression artérielle (PA) et une plus grande sécurité (risque de chute moins important). L'ergomètre permet aussi la réalisation d'un exercice plus facile chez les sujets en surpoids, même si le coût énergétique estimé par la consommation d'oxygène (VO_2) est supérieur de 5 à 6 ml/min/kg (1) (nécessité de mobiliser des jambes plus lourdes) par rapport à celui des sujets de morphologie normale.

LES AVANTAGES DU TAPIS ROULANT

Chez 80 % des sujets, les performances obtenues sur tapis roulant sont 5 à 11 % plus importantes que sur vélo en position assise (2-6).

La fréquence cardiaque maximale (FC max) est, elle aussi, souvent plus importante (7, 8) dans les études américaines, mais aucune différence n'est retrouvée dans quelques études européennes (Suisse) avec une FC max identique sur vélo et

*Service de Physiologie, UM Sports et Pathologies, CHU de Grenoble

sur tapis, malgré un pic de VO_2 plus important (+ 7 %) sur tapis roulant (6). Il n'est donc pas automatique d'avoir une différence de 5 à 10 battements entre les deux types d'épreuves d'exercice.

LES DIFFICULTÉS DE PRISE DE PA

Il est souvent mentionné dans les articles que la PA est plus haute sur vélo que sur tapis roulant (7), mais on ne retrouve pas toujours cette différence (6). La difficulté de la prise de PA sur tapis roulant et des problèmes méthodologiques (sur vélo, la PA doit être prise bras détendu, détachée du guidon) (9) rendent la comparaison hasardeuse. **Les différences ne semblent de toute façon pas majeures.**

LE MODE VENTILATOIRE CHEZ LE SUJET SAIN SPORTIF

Le mode ventilatoire sur les deux ergomètres est différent chez le sujet sain sportif (10). Ainsi, pour un même débit ventilatoire, mais avec un VO_2 plus grand sur tapis, les équivalents respiratoires sont plus bas et l'hypoxémie induite par l'exercice plus fréquente et plus profonde sur tapis.

LE MODE VENTILATOIRE CHEZ LE PATIENT BPCO

Chez les patients avec une pathologie broncho-pulmonaire obstructive (BPCO), bien que les performances soient aussi plus importantes sur tapis, on n'observe pas de différence dans les adaptations ventilatoires, même si le débit ventilatoire a tendance à être plus important sur vélo (11).

LE DIAGNOSTIC DE LA MALADIE CORONAIRE

Il a été rapporté que la sensibilité diagnostique de la maladie coronaire est plus importante sur tapis roulant que sur vélo (12), mais les deux ergomètres sont également

utilisables et aucune distinction n'est faite dans les recommandations pour la détection de la maladie coronaire (13, 14).

LA TABLE D'ERGOMÉTRIE INCLINÉE

Les performances réalisées sur table d'ergométrie inclinée à 45 degrés comme pour l'échographie d'effort sont identiques à celle d'un vélo assis. **Les résultats peuvent donc être utilisés si l'épreuve a été vraiment maximale.**

L'ÉPREUVE D'EFFORT AVEC LES BRAS

L'épreuve d'effort peut être réalisée avec les bras chez des sujets ayant des difficultés avec les jambes. Dans ce cas, les performances sont le plus souvent bien inférieures (- 25 % en moyenne) à celles que l'on peut observer avec les jambes parce que la masse musculaire en jeu est plus faible et parce que la plupart des sujets sont souvent peu entraînés avec les bras et enfin parce que le rendement est moins bon (15). **L'interprétation des résultats est bien sûr difficile.**

LE CHOIX DU PROTOCOLE INFLUENCE-T-IL LES RÉSULTATS DE L'ÉPREUVE D'EFFORT ?

Il est possible de réaliser différents types d'explorations à l'exercice en fonction des patients, des indications ou encore de l'hypothèse physiopathologique.

LES ÉPREUVES D'EXERCICE INCRÉMENTALES

Réalisées avec ou sans enregistrement des échanges gazeux, ce sont les épreuves les plus fréquemment réalisées dans les laboratoires d'exploration. Le but de ces tests est d'amener le sujet au maximum de ses possibilités, quel que soit le motif d'arrêt.

► Les trois principales méthodes

Trois méthodes sont principalement utilisées.

- **Les incréments continus**, dits en rampe, avec une augmentation de l'intensité de l'effort toutes les 1 à 10 secondes.
- **Les incréments progressifs par paliers courts** de 1 minute, souvent considérés comme équivalents à des protocoles en rampe.
- **Les incréments progressifs par paliers longs** de 3 minutes (supposés amenés à un "pseudo" état stable métabolique) **ou intermédiaires** de 2 minutes.

Les deux premiers types de tests sont parfaits pour mesurer la puissance maximale aérobie, paramètre majeur pour le diagnostic et le pronostic des pathologies cardiorespiratoires. Les paliers plus longs, de 3 minutes ou plus permettent surtout de déterminer la capacité aérobie (ou endurance), mais sont moins adaptés pour mesurer des performances maximales, surtout chez des sujets non sportifs. Les paliers de 2 minutes peuvent aussi être difficiles chez des sujets peu entraînés.

► La durée optimale

Les études initiales, menées chez seulement 12 sujets sains, sur tapis roulant et vélo, suggèrent que **les tests d'exercice doivent avoir une durée de 10 minutes en moyenne** (16) (de 8 à 17 minutes d'après l'article), pour obtenir des performances maximales. Cependant, comme cette durée "optimale" est reprise dans toutes les recommandations (1, 17), les protocoles doivent être individualisés pour répondre à ce critère de temps.

► L'intensité de l'exercice

Dans tous les cas, après une période d'échauffement de 3 minutes en moyenne, à faible intensité (allant par exemple, de "sans charge" à

CLASSE FONCTIONNELLE	STATUT CLINIQUE	COÛT O ₂ ml/kg/min	METS	CYCLOERGOMÈTRE	PROTOCOLE SUR VÉLO DE COURSE				METS				
Normal et I	Sain, dépendant de l'âge, activité			1 watt = 6,1 kg/m/min pour un poids de corps de 70 kg kg/m/min	BRUCE MODIFIÉ 3 min Étapes	BRUCE 3 min Étapes	NAUGHTON						
										mph	% GR	mph	% GR
										6,0	22	6,0	22
										5,5	20	5,5	20
										5,0	18	5,0	18
										56,0	16		
										52,5	15		
										49,0	14		
										45,5	13	1 500	
										42,0	12	1 350	
										38,5	11	1 200	
										35,0	10	1 050	
										31,5	9	900	
										28,0	8	750	
										24,5	7	600	
										21,0	6	450	
17,5	5	300											
14,0	4	150											
10,5	3												
7,0	2												
3,5	1												
II	Sédentaire sain												
III	Limité												
IV	Symptomatique												

>>> Tableau 1 - Comparaison du coût énergétique (en METS et en VO₂) pour différents protocoles d'exercice sur tapis roulant et vélo (23).

mph = mille par heure ; GR = grade

des puissances déjà significatives de 80 ou 100 watts pour les sujets entraînés sur vélo), **l'augmentation de l'intensité de l'exercice sera progressive**, selon les cas de 5 à 30 watts/min sur vélo. Les équations théoriques disponibles pour déterminer les performances aérobies maximales d'un sujet doivent être utilisées, pondérées en fonction du niveau d'entraînement et d'une éventuelle pathologie pour choisir un protocole adéquat.

► Les protocoles

Sur tapis roulant, les protocoles à notre disposition mixent pente et vitesse pour progressivement incrémenter l'intensité de l'exercice. **Le protocole de Bruce** (18), le plus utilisé, est pourtant un protocole inadapté à la majorité des situations, parce qu'il est long, très rapidement intense (le premier palier engendre

une demande déjà de 5 METS !) et parce qu'il ne permet pas une augmentation linéaire de la charge (Tab. 1). Il a d'ailleurs été initialement développé pour la détection de la maladie coronaire, mais n'est pas adapté pour mesurer une performance maximale, surtout chez les sujets porteurs de cardiopathie (19). Même si beaucoup d'études et d'indices dérivent de ce protocole, on lui préférera **le protocole de Balke**, plus progressif ou **un protocole en rampe classique individualisé** (19). Dans la plupart des protocoles, et parce que beaucoup de sujets sont incapables de courir, la vitesse reste une vitesse de marche et la pente sert d'ajustement. Chez un sportif désireux d'avoir des repères d'entraînement, on gardera une pente constante (0 ou 1 %) et on incrémentera uniquement la vitesse de course.

LES ÉPREUVES D'EFFORT ABRUPTES

► Les avantages

La sensibilité des tests d'effort pour la détection de certaines pathologies reste imparfaite. Des tests immédiatement proches des possibilités maximales du sujet (mesurées ou supposées) sont parfois employés. Ces tests ont été utilisés en cardiologie pour une meilleure détection de la maladie coronaire ou pour s'assurer de l'efficacité des traitements bêta-bloquants (20), mais ils ont peu d'intérêt actuellement. Ils peuvent être utilisés pour détecter des arythmies adrénérurgiques en cas de symptôme évocateur et d'épreuve d'effort "standard" non contributive. Ils sont régulièrement utilisés en pneumologie pour la détection d'une hyperréactivité bronchique induite par l'exercice.

► Le principe

L'épreuve abrupte est réalisée à une intensité constante (l'intensité cible est atteinte en 1 à 2 minutes au maximum), ce qui permet d'obtenir une sollicitation ventilatoire de 60 à 80 % du débit ventilatoire maximal. Elle doit durer au moins 4 minutes (en général, de 6 à 8 minutes), mais ne doit pas être trop longue pour éviter l'effet bronchodilatateur des catécholamines (21). Ce test ne permet évidemment pas de faire les autres analyses classiques des épreuves d'effort.

LES ÉPREUVES À INTENSITÉ CONSTANTE

Ces épreuves sont de plus en plus pratiquées, à des intensités variables, surtout pour étudier des adaptations ventilatoires, l'effet de certains traitements ou de certaines interventions (réentraînement à l'effort par exemple). Elles sont actuellement, peut-être à tort, peu utilisées en cardiologie.

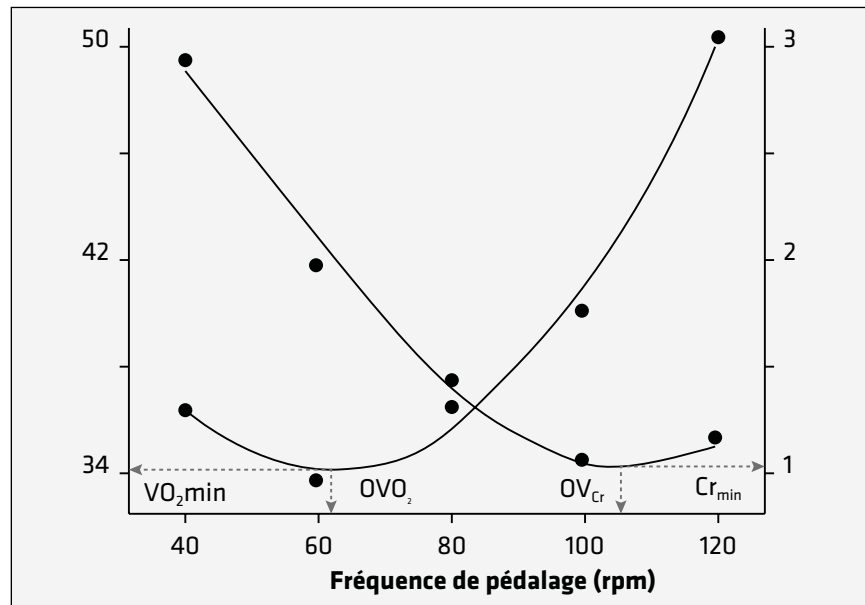
► Le principe et les avantages

Ces tests durent en général plus de 6 minutes à des intensités correspondant soit à une intensité précise de la vie quotidienne, soit à une situation concrète (par exemple en médecine du travail). Leur intérêt peut aussi être d'approcher des valeurs maximales de VO_2 et de stimulation ventilatoire en utilisant des intensités au-dessus du seuil ventilatoire. **Ces épreuves peuvent être mieux supportées qu'une épreuve incrémentale classique** (1).

LE CHOIX D'AUTRES PARAMÈTRES INFLUENCE-T-IL LES RÉSULTATS DE L'ÉPREUVE D'EFFORT ?

L'INSTALLATION

Dans tous les cas, le sujet doit être



>>> Figure 1 - Relation entre la fréquence de pédalage et la consommation d'oxygène (VO_2 ; OVO_2 = consommation d'oxygène minimale, dite optimale) d'une part et le coût énergétique d'autre part (Cr ; OV_{Cr} = coût énergétique minimal, dit optimal). Modifié d'après (22) pour une puissance constante de 150 watts.

bien installé et le déroulement du test doit être expliqué par l'équipe technique. L'interprétation de certains paramètres (FC, PA ou ventilation) peut être rendue difficile par un stress important. Lorsqu'il existe de telles manifestations, il peut être intéressant de faire réaliser au sujet un test sous-maximal d'habituation et de le convoquer à un autre moment pour l'épreuve maximale.

LA FRÉQUENCE DE PÉDALAGE

Sur le vélo, le facteur principal de modulation est la fréquence de pédalage. Sur les bicyclettes ergométriques utilisées pour la réalisation de nos épreuves d'effort, la puissance délivrée par le vélo (dans une gamme de puissance maximale, variable selon les constructeurs, de 400 à 999 watts) ne dépend pas de la fréquence de pédalage, en tout cas dans une fourchette de fréquence, garantie par le constructeur, par exemple entre 30 et 130/min. Ces caractéristiques techniques importantes sont à vérifier

pour chaque matériel et peuvent directement influencer notre pratique des épreuves d'exercice.

Malgré tout, même pour une puissance donnée, la fréquence de pédalage est un paramètre majeur du coût énergétique en vélo (22) (Fig. 1). En effet, pour une puissance donnée, la fréquence de pédalage modifie la valeur du VO_2 mesuré, et il existe pour toute personne une fréquence de pédalage dite optimale (un pattern de pédalage), relativement "naturelle", qui sollicite un VO_2 minimal. Elle se situe en général entre 40 et 70 tours par minute (tpm) (22). Chez les sujets sportifs, elle peut être supérieure à 80 tpm, et chez les cyclistes entraînés, elle se situe entre 90 et 110 tpm. Ces valeurs sont donc très individuelles. **Il peut être intéressant de laisser les sujets choisir leur fréquence de pédalage en leur expliquant que celle-ci doit être confortable.** Elle doit être maintenue tout au long de l'effort : on peut

accepter qu'elle augmente (c'est de toute façon nécessaire pour développer des puissances importantes). En revanche, une diminution est un signe de fatigue musculaire qui accompagne souvent la fin de l'exercice. Dans notre pratique quotidienne, la majorité des laboratoires d'exploration impose une fréquence de pédalage de 60/min ou entre 60 et 70 tpm. De la même façon que nous n'imposons pas une amplitude et une fréquence de pas lors d'une épreuve d'exercice sur tapis roulant, il est logique de laisser le sujet choisir sa fréquence de pédalage pour la réalisation du test d'exercice. Elle se situe plutôt entre 50 et 60 tpm pour les sujets peu entraînés et plutôt au-delà de 70-80 tpm pour les sportifs.

CONCLUSION

L'exploration à l'effort ne se résume pas au test de 30 watts/3 minutes réalisé sur vélo à une fréquence de pédalage de 60 tpm ou au protocole de Bruce sur tapis roulant ! Au contraire, **les modalités d'exploration à l'effort sont multiples dès lors que l'on connaît l'influence des paramètres sur les résultats.** Le test d'exercice triangulaire classique, tel que nous le réalisons dans nos laboratoires d'exploration, est un test de mesure de la capacité d'effort et des paramètres maximaux d'exercice. Il permet aussi, en obligeant l'organisme à répondre rapidement à une demande accrue en oxygène, de mettre éventuellement en évidence un facteur limitant, par exemple coronarien. Mais une limitation à

l'exercice maximale explique-t-elle obligatoirement les symptômes que l'on explore ?

Avec toutes les limites méthodologiques décrites, il peut aussi être mis en défaut, souvent parce qu'il ne permet pas de reproduire de façon fiable les conditions d'apparition d'un symptôme de la vie courante. **Il faut donc savoir adapter les protocoles d'exercice pour mieux explorer ces symptômes.** La plupart des symptômes apparaissant dans les efforts de la vie quotidienne, donc à des intensités sous-maximales, des tests sous-maximaux à intensité constante permettraient probablement d'apporter des informations complémentaires adaptées. Ils méritent donc sûrement d'être développés et essayés.

BIBLIOGRAPHIE

1. American Thoracic S, American College of Chest P. ATS/ACCP Statement on cardiopulmonary exercise testing. *Am J Respir Crit Care Med* 2003 ; 167 : 211-77.
2. Astrand PO, Saltin B. Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity. *J Appl Physiol* 1961 ; 16 : 977-81.
3. Gavin TP, Stager JM. The effect of exercise modality on exercise-induced hypoxemia. *Respir Physiol* 1999 ; 115 : 317-23.
4. Hermansen L, Ekblom B, Saltin B. Cardiac output during submaximal and maximal treadmill and bicycle exercise. *J Appl Physiol* 1970 ; 29 : 82-6.
5. Myers J, Buchanan N, Walsh D et al. Comparison of the ramp versus standard exercise protocols. *J Am Coll Cardiol* 1991 ; 17 : 1334-42.
6. Maeder M, Wolber T, Atefy R et al. Impact of the exercise mode on exercise capacity: bicycle testing revisited. *Chest* 2005 ; 128 : 2804-11.
7. Wicks JR, Sutton JR, Oldridge NB et al. Comparison of the electrocardiographic changes induced by maximam exercise testing with treadmill and cycle ergometer. *Circulation* 1978 ; 57 : 1066-70.
8. Hermansen L, Saltin B. Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle exercise. *J Appl Physiol* 1969 ; 26 : 31-7.
9. Sharman JE, LaGerche A. Exercise blood pressure: clinical relevance and correct measurement. *J Hum Hypertens* 2015 ; 29 : 351-8.
10. Tanner DA, Duke JW, Stager JM. Ventilatory patterns differ between maximal running and cycling. *Respir Physiol Neurobiol* 2014 ; 191 : 9-16.
11. Holm SM, Rodgers W, Haennel RG et al. Effect of modality on cardiopulmonary exercise testing in male and female COPD patients. *Respir Physiol Neurobiol* 2014 ; 192 : 30-8.
12. Hambrecht RP, Schuler GC, Muth T et al. Greater diagnostic sensitivity of treadmill versus cycle exercise testing of asymptomatic men with coronary artery disease. *Am J Cardiol* 1992 ; 70 : 141-6.
13. Wolk MJ, Bailey SR, Doherty JU et al. Multimodality appropriate use criteria for the detection and risk assessment of stable ischemic heart disease: a report of the American College of Cardiology Foundation Appropriate Use Criteria Task Force, American Heart Association, American Society of Echocardiography, American Society of Nuclear Cardiology, Heart Failure Society of America, Heart Rhythm Society, Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, Society of Cardiovascular Computed Tomography, Society for Cardiovascular Magnetic Resonance, and Society of Thoracic Surgeons. *J Am Coll Cardiol* 2014 ; 63 : 380-406.
14. Task Force M, Montalescot G, Sechtem U et al. 2013 ESC guidelines on the management of stable coronary artery disease: the Task Force on the management of stable coronary artery disease of the European Society of Cardiology. *Eur Heart J* 2013 ; 34 : 2949-3003.
15. Kang J, Robertson RJ, Goss FL et al. Metabolic efficiency during arm and leg exercise at the same relative intensities. *Med Sci Sports Exerc* 1997 ; 29 : 377-82.
16. Buchfuhrer MJ, Hansen JE, Robinson TE et al. Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 1983 ; 55 : 1558-64.
17. Balady GJ, Arena R, Sietsema K et al. Clinician's Guide to cardiopulmonary exercise testing in adults: a scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 2010 ; 122 : 191-225.
18. Bruce RA. Exercise testing of patients with coronary heart disease. Principles and normal standards for evaluation. *Ann Clin Res* 1971 ; 3 : 323-32.
19. Myers J, Bellin D. Ramp exercise protocols for clinical and cardiopulmonary exercise testing. *Sports Med* 2000 ; 30 : 23-9.
20. Aellig WH, Prichard BN, Richardson GA. The acute exercise test for the preliminary evaluation of beta-receptor blocking drugs in angina pectoris. *Br J Pharmacol* 1969 ; 37 : 527P-8P.
21. Rundell KW, Slee JB. Exercise and other indirect challenges to demonstrate asthma or exercise-induced bronchoconstriction in athletes. *J Allergy Clin Immunol* 2008 ; 122 : 238-46.
22. Belli A, Hintzy F. Influence of pedalling rate on the energy cost of cycling in humans. *Eur J Appl Physiol* 2002 ; 88 : 158-62.
23. Colquhoun D, Freedman B, Cross D et al. Clinical Exercise Stress Testing in Adults (2014). *Heart Lung Circ* 2015 ; 24 : 831-7.

2

Sportif asymptomatique, épreuve d'effort douteuse...

Que faire ?

Dr Laurent Chevalier*

Comme dans le reste de la population, il arrive que les sportifs présentent lors d'un test d'effort de dépistage des résultats pouvant prêter à discussion.

Troubles de repolarisation, troubles du rythme, profil tensionnel élevé, autant de raisons de suspecter une anomalie chez un sujet ne se plaignant de rien. Bien sûr, le praticien peut être particulièrement indécis dans ces cas-là, tiraillé entre une capacité d'effort souvent significative et tout de même rassurante et un enjeu médico-légal non négligeable puisqu'il devra délivrer un feu vert ou un interdit au décours de son bilan.

PROFIL TENSIONNEL ANORMAL

DÉFINIR LE NIVEAU D'EFFORT

Le caractère "anormal" des chiffres tensionnels à l'effort reste délicat à définir. Les recommandations françaises (1) retiennent une pression systolique à 240 mmHg comme un motif d'arrêt d'un test d'effort sur ergocycle. Mais nous savons bien que des activités comme l'haltérophilie, la musculation lourde ou les poussées en mêlée génèrent des montées au-delà de 300 mmHg de

manière répétée au cours d'entraînements quotidiens, sans évolution péjorative sur le court et le moyen terme. Cependant, certains travaux ont souligné **la corrélation entre valeurs systoliques d'effort importantes sur cycloergomètre et infarctus du myocarde à plus de 12 ans de distance** (2, 3), d'où l'intérêt d'une prise en compte de ce paramètre.

RÉALISER UNE MESURE AMBULATOIRE DE LA PRESSION ARTÉRIELLE

Si le praticien juge suspect le profil tensionnel pour un niveau d'effort donné, il peut être intéressant d'évaluer le patient de manière plus étayée en réalisant une mesure ambulatoire de la pression artérielle (MAPA) incluant en fin d'enregistrement un effort physique intense, sur vélo par exemple. Même si la méthodologie a ses limites, notamment pour des activités sportives habituelles dépourvues de récupération ou menées en milieu aquatique, les renseignements sur la réalité du profil tensionnel en situation et sur l'existence éventuelle d'une HTA inconnue jusqu'alors peuvent être précieux. **Gardons à l'esprit le caractère toujours suspect d'une HTA chez un jeune sportif**, la cause principale étant la consommation répétée de certaines substances à visée dopante.



© monkeybusinessimages - iStock

Un test d'effort douteux sur un sportif asymptomatique peut nécessiter une investigation plus poussée.

ARYTHMIES SUPRA-VENTRICULAIRES

ATTENTION AUX FORMES RÉPÉTITIVES

La survenue d'extrasystoles supra-ventriculaires en nombre lors d'un effort ou en récupération de celui-ci ne doit pas être négligée, surtout en cas de formes répétitives. Même si la question n'est pas définitivement tranchée, il semble tout de même que **les activités sportives soutenues et prolongées constituent un facteur de risque de fibrillation ou**

*Unité Cardiologie du Sport, Clinique du Sport de Bordeaux-Mérignac

de flutter atriaux paroxystiques, notamment chez les hommes, à un âge moins avancé que dans la population générale et plus souvent dans une ambiance vagale (4-6).

DÉFINIR LE STATUT RYTHMIQUE

L'interrogatoire "policier" sur le ressenti de palpitations pendant l'effort ou en récupération immédiate ou tardive de celui-ci est fondamental. En complément d'un dosage de la kaliémie, de la calcémie et de la TSH, un Holter incluant en fin d'enregistrement un effort significatif et une période de récupération d'au moins 30 minutes sera le bienvenu pour jauger plus précisément le statut rythmique. Une échocardiographie permettra également de quantifier la dilatation des massifs atriaux, facteur de risque emboligène complémentaire du score CHADS2-VASC2.

ARYTHMIES VENTRICULAIRES

ANALYSER L'AXE, LA LARGEUR DES QRS, LE COUPLAGE

Les extrasystoles ventriculaires survenant à l'effort requièrent une attention certaine. L'analyse de l'axe, de la largeur des QRS et du couplage peut déjà orienter vers certaines étiologies. Les complexes provenant de l'infundibulum pulmonaire ou de la branche postérieure gauche du His sont connus pour leur caractère le plus souvent bénin. **Cependant, la prudence doit rester de mise, surtout si l'effort ou la récupération déclenchent des formes répétitives.**

PRATIQUER UN INTERROGATOIRE ET DES DOSAGES

Avant d'aller plus loin dans les examens complémentaires, l'interrogatoire doit rechercher d'éventuelles pertes hydriques marquées dans les jours précédents, l'utilisation

de diurétiques et surtout de compléments alimentaires, voire de produits dopants, potentiellement arythmogènes. Là aussi, le dosage de la kaliémie, de la calcémie et de la protéine C réactive (CRP) semblent nécessaires.

RÉALISER DES EXAMENS COMPLÉMENTAIRES

Un enregistrement Holter incluant une période d'effort *on the field* devra être bien pesée car le risque rythmique est évidemment différent de celui de l'étage supra-ventriculaire. Il est préférable que la séance d'activité sportive soit réalisée en présence de témoins. Il paraît donc raisonnable, de réaliser tout d'abord un test de recherche d'ischémie de type scintigraphie myocardique ou échocardiographie d'effort. Ce dernier examen permettra dans le même temps une étude des architectures ventriculaires gauche et droite afin d'éliminer les éventualités diagnostiques arythmogènes que sont la cardiomyopathie hypertrophique (CMH) et la maladie arythmogène ventriculaire droite ou autre atteinte du ventricule droit, encore mieux visualisées par l'IRM de stress, encore très confidentielle, mais dont l'avenir semble prometteur (7). Devant un tableau d'arythmie ventriculaire significative à l'effort, il paraît en effet difficile en 2015 de se passer d'une IRM du myocarde de repos. Complémentaire de l'échographie pour les diagnostics de CMH et d'anomalie du ventricule droit, l'IRM fournit par ailleurs de précieux renseignements sur une éventuelle myocardite semi-récente dont le pouvoir arythmogène peut être redoutable.

EN CAS DE BILAN NÉGATIF

Dans l'hypothèse d'un bilan étiologique exhaustif négatif, le pronostic à moyen terme semble excellent comme l'ont souligné plusieurs travaux (8, 9). Que la diminution de la

charge d'entraînement soit significative (10) ou que les sportifs poursuivent leur pratique (11), il semble effectivement que la charge extrasystolique diminue avec le temps, même si **une surveillance espacée de la contractilité ventriculaire paraît nécessaire** (11).

TROUBLES DE REPOLARISATION

VÉRIFIER LE CARACTÈRE VRAI DES ANOMALIES OBSERVÉES

L'apparition à l'effort d'une onde T négative, d'un courant de lésion du segment ST peuvent à juste titre inquiéter le praticien sur la qualité de la perfusion myocardique à l'effort (12).

L'approche bayésienne reste indispensable dans l'appréciation du caractère "vrai" des anomalies observées. Âge, facteurs de risque, niveau d'effort, double produit, profil tensionnel sont autant de paramètres décisifs pour déterminer la suite du bilan. Rappelons également le caractère précieux de la boucle ST/FC (13) dont le degré de sensibilité est tout à fait intéressant.

Si le praticien juge très peu probable, sur le risque a priori, le caractère ischémique des anomalies de repolarisation, l'abstention vis-à-vis d'autres examens complémentaires peut être retenue et le certificat de non contre-indication au sport en compétition délivré.

Les tests réalisés sur tapis roulant sont classiquement pourvoyeurs de sous-décalages artéfactuels, et il est important d'analyser le caractère continu ou intermittent du courant de lésion ainsi que sa persistance ou non dans les premières secondes de récupération. Cependant, dans une enquête multicentrique française en attente de publication, malgré le respect de ces précautions de lecture, la proportion de "faux-positifs"

chez les sportifs évalués sur tapis n'est pas négligeable.

RÉALISER UN TEST DE NIVEAU DE FIABILITÉ SUPÉRIEUR

Aussi, devant une anomalie de la repolarisation significative, dans le cas de tests réalisés sur cycloergomètre, il nous semble raisonnable, notamment pour les disciplines à haute sollicitation cardiovasculaire, de s'assurer de l'absence d'ischémie myocardique en envisageant un test d'évaluation doté d'un niveau de fiabilité supérieur, de type échocardiographie d'effort ou scintigraphie myocardique. En effet, au-delà de la coronaropathie athéromateuse, n'oublions pas l'anomalie de naissance de coronaire qui reste un diagnostic rare mais classique d'isché-

mie myocardique d'effort malgré l'absence de tout facteur de risque athéromateux.

L'échocardiographie d'effort aura cependant l'avantage sur la scintigraphie de visualiser les ostia coronaires avant le début de l'effort mais également de nous renseigner sur l'évolution de la cinétique du ventricule droit, des appareils valvulaires et des pressions pulmonaires jusqu'à un certain niveau d'effort. Il est en revanche parfois nécessaire, chez des athlètes de bon niveau, de disposer d'un pédalier autorisant des charges de travail supérieures à 400 watts.

Un résultat normal de l'un de ces examens complémentaires sera synonyme d'excellent pronostic à terme (14).

CONCLUSION

L'importante sollicitation cardiovasculaire de certaines activités sportives et le contexte médico-légal n'autorisent pas la persistance du doute en cas d'anomalies révélées par l'épreuve d'effort de dépistage systématique. Un bilan complémentaire adéquat à visée étiologique est donc indispensable. Cependant, en l'absence de diagnostic pathologique finalement porté, il paraît tout à fait raisonnable et justifié pour le praticien de ne pas céder à la tentation de "prendre le maximum de précautions" en interdisant à son patient la poursuite de son sport préféré, si bénéfique par ailleurs en termes de bien-être physique et psychologique.

BIBLIOGRAPHIE

1. Recommandations de la Société Française de Cardiologie concernant la pratique des épreuves d'effort chez l'adulte en cardiologie. Arch Mal Cœur Vaiss 1998 ; 1 : 35-49.
2. Mundal R, Kjedsen SE, Sandvik L et al. Exercise blood pressure predicts mortality from myocardial infarction. Hypertension 1996 ; 27 : 324-9.
3. Laukkanen JA, Kurl S, Rauramaa R et al. Systolic blood pressure response to exercise testing is related to the risk of acute myocardial infarction in middle-aged men. Eur J Cardiovasc Prev Rehabil 2006 ; 13 : 421-8.
4. Mont L, Sambola A, Brugada J et al. Long-lasting sport practice and lone atrial fibrillation. Eur Heart J 2002 ; 23 : 447-82.
5. Sorokin AV, Araujo CG, Zweibel S et al. Atrial fibrillation in endurance-trained athletes. Br J Sports Med 2011 ; 45 : 185-8.
6. Calvo N, Brugada J, Sitges M et al. Atrial fibrillation and atrial flutter in athletes. Br J Sports Med 2012 ; 46 : i37-43.
7. La Gerche A, Claessen G, Dymarkowski S et al. Exercise-induced right ventricular dysfunction is associated with ventricular arrhythmias in endurance athletes. Eur Heart J 2015 ; 36 : 1998-2010.
8. Biffi A, Pelliccia A, Verdile L et al. Long-term clinical significance of frequent and complex ventricular tachyarrhythmias in trained athletes. J Am Coll Cardiol 2002 ; 40 : 446-52.
9. Biffi A, Maron BJ, Verdile L et al. Impact of physical deconditioning on ventricular tachyarrhythmias in trained athletes. J Am Coll Cardiol 2004 ; 44 : 1053-8.
10. Biffi A, Maron BJ, Culasso F et al. Patterns of ventricular tachyarrhythmias associated with training, deconditioning and retraining in elite athletes without cardiac abnormalities. Am J Cardiol 2011 ; 107 : 697-703.
11. Delise P, Sitta N, Lanari E et al. Long-term effect of continuing sports activity in competitive athletes with frequent ventricular premature complexes and apparently normal heart. Am J Cardiol 2013 ; 112 : 1396-402.
12. Van de Sande DA, Hoogeveen A, Hoogsteen J et al. The diagnostic accuracy of exercise electrocardiography in asymptomatic recreational and competitive athletes. Scand J Med Sci Sports 2015 ; [Epub ahead of print].
13. Parrens E, Douard H, Couffinal T et al. The exercise-recovery loop and exercise slope of ST segment changes/heart rate in the diagnosis of coronary disease and restenosis after angioplasty. Arch Mal Cœur Vaiss 1994 ; 87 : 1283-8.
14. Pigozzi F, Spataro A, Alabiso A et al. Role of exercise stress test in master athletes. Br J Sports Med 2005 ; 39 : 527-31.

3 La récupération après l'épreuve d'effort

Importance de l'analyse des paramètres

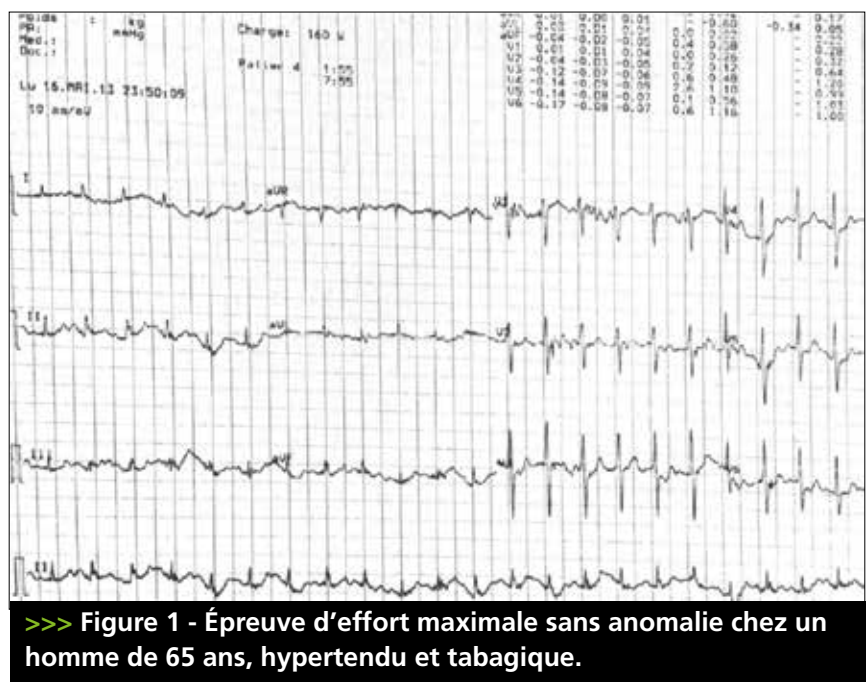
Dr Jean-Yves Tabet^{1,2}, Dr Philippe Meurin², Dr Ahmed Ben Driss²

L'épreuve d'effort reste un examen incontournable pour le dépistage et le suivi des maladies coronaires. Cette épreuve sera volontiers couplée à l'analyse des échanges gazeux chez l'athlète et chez les patients insuffisants cardiaques afin d'évaluer précisément leur tolérance à l'effort. Si l'analyse des différents paramètres au cours de l'effort est évidemment primordiale, la période de récupération est une période riche d'enseignements à ne pas négliger.

Trois paramètres électrocardiographiques importants peuvent être analysés pendant la période de récupération lors d'une épreuve effort standard :

- l'évolution du segment ST ;
- l'évolution de la fréquence cardiaque ;
- l'apparition de troubles du rythme ou de conduction.

Lorsque l'épreuve d'effort est couplée à l'analyse des échanges respiratoires, l'évolution de la décroissance de la consommation d'oxygène en récupération peut aussi être analysée.



>>> Figure 1 - Épreuve d'effort maximale sans anomalie chez un homme de 65 ans, hypertendu et tabagique.

ÉVOLUTION DU SEGMENT ST EN RÉCUPÉRATION

Un homme de 65 ans, hypertendu, et tabagique, réalise une épreuve d'effort standard dans le cadre du bilan de douleurs thoraciques atypiques, dans un contexte de stress. L'épreuve d'effort, menée à 160 watts avec un profil tensionnel "normal", est considérée comme satisfaisante, cliniquement et électriquement, "négative" au maximum de l'effort (Fig. 1).

L'analyse du tracé en récupération montre l'apparition d'un sous-décalage du segment ST dans les dérives septo-apico-latérales (Fig. 2).

Le patient bénéficie d'une scintigraphie myocardique d'effort qui confirme l'existence d'une ischémie myocardique significative intéressant les territoires apico-latéraux. La coronarographie confirme l'existence de lésions significatives intéressant l'artère interventriculaire antérieure (IVA), la bissectrice et la première diagonale.

Ce cas clinique illustre le caractère pathologique de la majoration ou de l'apparition d'un sous-décalage du segment ST en période de récupération, c'est-à-dire quand la fréquence cardiaque diminue. Ceci est classiquement évalué par l'analyse de la boucle ST/FC.

¹Service de cardiologie de l'hôpital Lariboisière, Paris

²Centre de réadaptation cardiaque des Grands Prés, Villeneuve-Saint-Denis

Chez un sujet sain, indemne de lésion coronaire significative, la boucle ST/FC évolue dans le sens anti-horaire exprimant le fait qu'un éventuel sous-décalage du segment ST (lié par exemple à une hypertrophie ventriculaire gauche) va régresser rapidement en récupération, c'est-à-dire lorsque la fréquence cardiaque diminue. Ainsi, pour une même fréquence cardiaque, le sous-décalage éventuel du segment ST doit être plus marqué lors de l'effort que lors de la récupération.

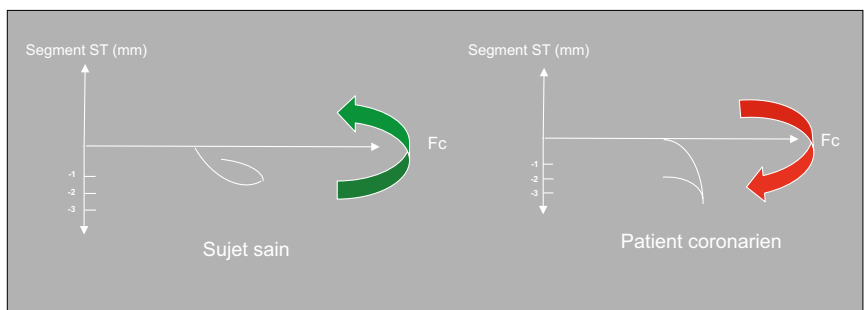
Inversement, chez un patient coronarien, la dette en oxygène accumulée lors de l'effort peut se traduire par une majoration du sous-décalage du segment ST en récupération. Ainsi, pour une même fréquence cardiaque, le sous-décalage du segment ST sera plus marqué en récupération que pendant l'effort et la boucle ST/FC évolue alors selon un mode "horaire" (Fig. 3).

Une étude réalisée sur 825 patients ayant bénéficié d'une épreuve d'effort diagnostique sur tapis montre que l'apparition d'un sous-décalage en récupération est un phénomène fréquent. En effet, dans cette population, 214 sujets (25,9 %) ont présenté un sous-décalage significatif du segment ST, 151 (70,5 %) pendant l'effort et 63 (29,5 %) au cours de la récupération. Le suivi à 9 ans de ces patients montrait un surrisque identique d'événements coronariens (OR = 2,54 chez les patients présentant un sous-décalage du segment ST à l'effort ; OR = 2,38 chez ceux présentant un sous-décalage du segment ST en récupération) (1).

Une seconde étude rétrospective, incluant 653 patients ayant eu une épreuve d'effort positive sur tapis et ayant bénéficié dans les 6 mois d'une coronarographie, montrait une incidence plus faible de la



>>> Figure 2 - Apparition d'un sous-décalage de ST significatif en récupération chez le même sujet que la figure 1.



>>> Figure 3 - Boucles ST/FC en récupération. Sens anti-horaire chez le sujet sain et sens horaire chez le coronarien.

positivité d'une épreuve d'effort en récupération (79 patients sur 653, soit 12 %). Toutefois, l'incidence de lésions coronariennes significatives était superposable à celle des patients présentant un sous-décalage du segment ST à l'effort (respectivement 78 vs 85 %, $p = 0,14$). Le pronostic des deux populations semblait identique mais peu interprétable compte tenu d'un trop grand nombre (43 %) de perdus de vue. Seule une proportion plus importante de lésions tritonculaires ou intéressant le tronc commun était retrouvée chez les patients présentant un sous-décalage du segment ST à l'effort (29 vs 18 %, $p = 0,045$) (2).

L'existence d'un sous-décalage significatif persistant pendant la période de récupération est donc pathologique et doit faire poursuivre les investigations.

LA FRÉQUENCE CARDIAQUE EN RÉCUPÉRATION

Au décours d'une épreuve d'effort triangulaire, la période de récupération est marquée par une chute de la fréquence cardiaque (et de la pression artérielle) liée initialement à l'action du frein vagal, puis à la décroissance du taux des catécholamines. La fréquence cardiaque en récupération (FCR) est calculée comme la différence entre la fréquence cardiaque maximale observée en fin d'effort et celle calculée à 1, 2 ou 3 minutes en récupération. Schématiquement, on considère que la chute de la fréquence cardiaque observée au cours des 2 premières minutes est le reflet de l'action du système parasympathique. Celle-ci comporte un grand nombre de facteurs de variations acquis (Encadré), mais aussi innés,

liés notamment au polymorphisme du gène codant pour le récepteur muscarinique à l'acétylcholine (3). Ce paramètre dépend également du matériel utilisé pour l'épreuve d'effort, la chute de la fréquence cardiaque étant légèrement plus lente sur tapis que sur vélo (4), ainsi, bien sûr, que du type de récupération (active ou passive) demandée au sujet.

CHEZ LES SUJETS SAINS

Une étude princeps publiée en 1999 a montré, sur une population de 2 428 patients ayant bénéficié d'une scintigraphie myocardique d'effort diagnostique sur tapis, que la diminution de l'activité du système parasympathique objectivée par un ralentissement de la chute de la FCR était un facteur pronostique majeur indépendamment de la réserve chronotrope, de la capacité d'effort et de l'existence d'une ischémie myocardique (5). Le seuil d'une chute de 12 battements au cours de la première minute de récupération semblait être le plus discriminant, et les résultats restaient valides chez les patients recevant un traitement bêtabloquant.

Une seconde étude réalisée sur plus de 5 700 sujets jeunes (42 à 53 ans), employés de la société civile de Paris, ayant bénéficié d'une épreuve d'effort avec un protocole spécifique (2 minutes à 82 watts, 6 minutes à 164 watts, puis 2 minutes à 191 watts, suivi d'une récupération passive) confirme ces résultats. Les sujets dont la fréquence cardiaque chute de moins de 25 battements au cours de la première minute de récupération présentent un surrisque (RR = 2,2) de décès par mort subite (6). Il est important de noter que ce seuil de 25 battements était obtenu dans une population très ciblée avec une épreuve d'effort adaptée.

FACTEURS DE VARIATION DE LA BAISSÉ DE LA FRÉQUENCE CARDIAQUE EN RÉCUPÉRATION (FCR) POST-EFFORT.

- Terrain facteurs génétiques
- Facteurs de risque cardiovasculaire +++
 - Âge
 - Sédentarité
 - HTA, obésité, syndrome métabolique
 - Tabac (femmes ++)
- Fraction d'éjection du ventricule gauche
- Traitement : inhibiteurs de l'enzyme de conversion, statines, bêtabloquant
- Modalités du test
 - Récupération active ou non
 - Tapis ou vélo
 - Mesure FCR à 1 ou 2 minutes

CHEZ LES PORTEURS D'UNE CARDIOPATHIE

L'altération très fréquente du système parasympathique, rencontrée dans les différents types de cardiopathies, se traduit par une altération de la chute de la FCR. Ainsi, cette chute avec un seuil de 12 battements au cours de la première minute garde une bonne valeur pronostique chez les patients coronariens en post-infarctus bénéficiant d'un traitement bêtabloquant et ce, indépendamment de l'âge, de la classification NYHA ou de l'existence d'un diabète (7).

La chute de la FCR est également altérée chez les patients porteurs d'une cardiomyopathie hypertrophique, avec ou sans gradient intraventriculaire gauche. Dans cette population, la détermination de seuils valides utilisables en pratique doit être précisée et sa valeur pronostique reste à démontrer (8). Enfin, l'insuffisance cardiaque s'accompagne également d'une altération importante de l'activité du système parasympathique, donc du profil de la FCR. Une étude princeps avait montré que la chute de la fréquence cardiaque était plus lente chez les patients

insuffisants cardiaques par rapport aux sujets sains et que le ralentissement de la chute de la fréquence cardiaque mesurée à 1, 2 et 3 minutes était d'autant plus marquée que l'insuffisance cardiaque était évoluée (9). Sur une cohorte de 87 patients – dont près de la moitié bénéficiaient d'un traitement bêtabloquant –, la baisse de la FCR observée au cours de la première minute, avec une valeur seuil de 6,5 bpm, avait une valeur pronostique indépendante et additive aux principaux paramètres issus de l'épreuve d'effort avec mesure des échanges respiratoires tels que la pente VE/VCO₂ (10). Ce seuil de 6 bpm a également été retrouvé par notre équipe mais le caractère indépendant et surtout la valeur additive de ce paramètre dans l'insuffisance cardiaque reste à démontrer (11).

ÉVOLUTION DE LA FCR EN RÉADAPTATION ET CHEZ LES SPORTIFS

Les programmes de réentraînement physique renforcent l'activité du système parasympathique. Ceci va se traduire par une amélioration de la FCR aussi bien chez les

patients coronariens que les insuffisants cardiaques (12, 13).

Les sportifs, surtout endurants, présentent une hypertonie vagale comparativement aux sujets non entraînés, ce qui explique leur augmentation de la FCR. Il n'existe pas toutefois dans cette population de normes reconnues. Par ailleurs, ce paramètre ne semble pas être corrélié aux performances sportives.

UTILISATION PRATIQUE DE LA FRÉQUENCE CARDIAQUE EN RÉCUPÉRATION

Ce paramètre, séduisant sur le plan physiologique, simple à mesurer et reproductible, reste toutefois peu utilisé en pratique courante pour plusieurs raisons.

- Il existe de nombreux paramètres de variations liés notamment aux traitements des sujets et aux conditions de réalisation du test d'effort et de la récupération.
- Il n'y a pas actuellement de normes reconnues chez les patients porteurs d'une cardiopathie.
- Enfin, si la FCR semble avoir une valeur pronostique indépendante, sa valeur additive, notamment à la capacité d'effort et à la réserve chronotrope, reste débattue (14).

TROUBLES DU RYTHME OU DE CONDUCTION EN RÉCUPÉRATION

La présence de troubles du rythme ou de conduction observés au décours d'un effort est évidemment à prendre en considération. Lors d'une épreuve d'effort chez un sujet sans cardiopathie connue,

la présence d'une hyperexcitabilité ventriculaire est un facteur pronostique plus puissant lorsque celle-ci apparaît seulement en récupération (ou à l'effort et en récupération) que lorsqu'elle survient uniquement à l'effort (15, 16). La présence de troubles du rythme ventriculaire a également une valeur pronostique péjorative chez les patients insuffisants cardiaques (17).

TEMPS DE RÉCUPÉRATION DU VO₂

La cinétique de décroissance du VO₂ en récupération dépend de la cinétique de resynthèse des réserves énergétiques musculaires (ATP, phosphocréatine) utilisées lors de l'exercice. L'insuffisance cardiaque se caractérise par une utilisation plus marquée de ces réserves au cours de l'effort et donc par un temps de resynthèse des réserves énergétiques allongé en raison de l'importance du déficit accumulé mais aussi du bas débit cardiaque ; ce bas débit ne permet pas, en récupération, un apport assez rapide en O₂ aux muscles pour assurer cette resynthèse. Ceci se traduit par un allongement du temps de demi-décroissance du VO₂ en récupération (T1/2 VO₂). Un sujet sain verra son VO₂ décroître de plus de 50 %, en moins de 80 secondes, alors qu'un patient insuffisant cardiaque verra son T1/2 VO₂ s'allonger et ce, de manière proportionnelle à son degré d'insuffisance cardiaque (de 100 à

180 secondes de la classe NYHA I à la classe IV) (9). La valeur pronostique de ce paramètre reste inférieure à celle du pic de VO₂ mais reste utilisable en cas de test d'effort sous-maximal. L'association d'une prolongation du T1/2 VO₂ et d'un pic de VO₂ abaissé confirme que l'on est en présence d'une insuffisance circulatoire sévère.

CONCLUSION

L'analyse des paramètres mesurés en période de récupération post test d'effort ne doit pas être négligée. Cette période correspond physiologiquement à un retour de l'action du frein vagal, puis à la décroissance du taux de catécholamines.

L'apparition d'un sous-décalage significatif apparaissant ou persistant pendant la période de récupération est pathologique et doit faire poursuivre les investigations à la recherche d'une pathologie coronaire. Une baisse limitée de la fréquence cardiaque pendant les 2 premières minutes de récupération a une valeur pronostique péjorative dans la population saine comme chez les cardiaques. Mais les nombreux facteurs de variations et l'absence de normes pour ce paramètre en cas de cardiopathie sont un frein important à son utilisation en routine. Enfin, en cas d'analyse associée des échanges gazeux, une baisse du temps de demi-décroissance du VO₂ a une valeur pronostique moindre que le pic de VO₂ ou que la pente VE/VCO₂ mais reste interprétable en présence d'un test sous-maximal.

BIBLIOGRAPHIE

1. Rywik TM, Zink RC, Gittings NS et al. Independent prognostic significance of ischemic ST-segment response limited to recovery from treadmill exercise in asymptomatic subjects. *Circulation* 1998 ; 97 : 2117-22.
2. Lanza GA, Mustilli M, Sestito A et al. Diagnostic and prognostic value of ST segment depression limited to the recovery phase of exercise stress test. *Heart* 2004 ; 90 : 1417-21.
3. Hautala AJ, Tulppo MP, Kiviniemi AM et al. Acetylcholine receptor M2 gene variants, heart rate recovery, and risk of cardiac death after an acute myocardial infarction. *Ann Med* 2009 ; 41 : 197-207.
4. Maeder MT, Ammann P, Rickli H, Brunner-La Rocca HP. Impact of the exercise mode on heart rate recovery after maximal exercise. *Eur J Appl Physiol* 2009 ; 105 : 247-55.
5. Cole CR, Blackstone EH, Pashkow FJ et al. Heart-rate recovery immediately after exercise as a predictor of mortality. *N Engl J Med* 1999 ; 341 : 1351-7.
6. Jouven X, Empana JP, Schwartz PJ et al. Heart-rate profile during exercise as a predictor of sudden death. *N Engl J Med* 2005 ; 352 : 1951-8.
7. Nissinen SI, Mäkikallio TH, Seppänen T et al. Heart rate recovery after exercise as a predictor of mortality among survivors of acute myocardial infarction. *Am J Cardiol* 2003 ; 91 : 711-4.
8. Patel V, Critoph CH, Finlay MC et al. Heart rate recovery in patients with hypertrophic cardiomyopathy. *Am J Cardiol* 2014 ; 113 : 1011-7.
9. Cohen-Solal A, Laperche T, Morvan D et al. Prolonged kinetics of recovery of oxygen consumption after maximal graded exercise in patients with chronic heart failure. Analysis with gas exchange measurements and NMR spectroscopy. *Circulation* 1995 ; 91 : 2924-32.
10. Arena R, Guazzi M, Myers J, Peberdy MA. Prognostic value of heart rate recovery in patients with heart failure. *Am Heart J* 2006 ; 151 : 851.e7-13.
11. Driss AB, Tabet JY, Meurin P et al. Heart rate recovery identifies high risk heart failure patients with intermediate peak oxygen consumption values. *Int J Cardiol* 2011 ; 149 : 284-5.
12. Hao SC, Chai A, Kligfield P. Heart rate recovery response to symptom-limited treadmill exercise after cardiac rehabilitation in patients with coronary artery disease with and without recent events. *Am J Cardiol* 2002 ; 90 : 763-5.
13. Myers J, Hadley D, Oswald U et al. Effects of exercise training on heart rate recovery in patients with chronic heart failure. *Am Heart J* 2007 ; 153 : 1056-63.
14. Savonen KP, Kiviniemi V, Laaksonen DE et al. Two-minute heart rate recovery after cycle ergometer exercise and all-cause mortality in middle-aged men. *J Inter Med* 2011 ; 270 : 589-96.
15. Frolkis JP, Pothier CE, Blackstone EH, Lauer MS. Frequent ventricular ectopy after exercise as a predictor of death. *N Engl J Med* 2003 ; 348 : 781-90.
16. Dewey FE, Kapoor JR, Williams RS et al. Ventricular arrhythmias during clinical treadmill testing and prognosis. *Arch Intern Med* 2008 ; 168 : 225-34.
17. O'Neill JO, Young JB, Pothier CE, Lauer MS. Severe frequent ventricular ectopy after exercise as a predictor of death in patients with heart failure. *J Am Coll Cardiol* 2004 ; 44 : 820-6.

4

Place des tests de terrain

Un outil de choix pour certains sportifs

Dr Thierry Laporte*

Les tests dits “de terrain” permettent d'évaluer *outdoor* les caractéristiques des grandes voies du métabolisme énergétique d'un individu. Dans cet article, nous nous limiterons volontairement aux épreuves explorant la seule voie énergétique aérobie, celle qui sollicite directement le système cardiovasculaire et qui est la seule véritablement explorée lors des tests à

visée cardiologique dans nos laboratoires d'explorations fonctionnelles.

LES CONDITIONS REQUISES

LE TEST DOIT ÊTRE MAXIMAL

Rappelons que le test d'effort médical en laboratoire, avec ou sans mesure du VO_2 , est indispensable pour tout patient qui désire utiliser un programme d'entraînement en

guise de complément thérapeutique. Le test de terrain, pour être interprétable, doit être maximal, il est donc à forte sollicitation cardiovasculaire et ne concerne que les sujets sains, sans facteurs de risque et sportifs ou futurs sportifs. En cas de doute sur ces conditions préalables, sa réalisation, surtout par un débutant, nécessite auparavant le feu vert de son médecin et sous la direction d'un coach ou d'un entraîneur qualifié s'il est en club.

*Cardiologue, Bordeaux

LE SUJET DOIT POUVOIR EXPLOITER SES PROPRES REPÈRES

Pour courir ou “pédaler” aux bonnes intensités d’entraînement, il est nécessaire que le sujet possède et exploite ses propres repères. Le test initial doit donc permettre une juste évaluation du niveau de forme physique (VO_2 max, vitesse maximale aérobie (VMA), seuils) afin de programmer, orienter et contrôler son entraînement.

Si l’absence de mesure directe des paramètres ventilatoires supprime la détermination directe du VO_2 max et surtout des deux seuils, le recueil de la fréquence cardiaque (FC) est aussi facilement réalisable que lors des tests en laboratoire grâce à l’utilisation d’un cardiofréquence-mètre (CFM). Celui-ci permettra en plus l’enregistrement en direct de la vitesse de course et donc la mesure de la VMA. De plus, le sportif se retrouvera dans son environnement habituel.

LE TEST DOIT ÊTRE FACILE À RÉALISER

Le test de terrain idéal doit être facile à réaliser, le plus “scientifiquement” fiable et le plus facilement reproductible dans le temps. La réalisation sur une piste d’athlétisme ou sur une piste cyclable plane lui permettra de passer le test avec des gestes biomécaniquement proches de ceux de sa pratique habituelle.

LES TESTS DISPONIBLES

LES DISCIPLINES SPORTIVES UTILISABLES

Ils concernent pour l’essentiel la marche ou la course à pied, ils sont plus délicats à mettre en œuvre pour le cyclisme. Des tests ont aussi été proposés pour la natation ou d’autres sports comme le canoë et le kayak, mais ils restent encore confidentiels et utilisés par les spécialistes.

LES DIFFÉRENTS TYPES DE TESTS

Deux catégories de tests sont réalisables :

- **les tests dits “rectangulaires”** qui consistent à courir la plus grande distance possible sur une durée déterminée. Le plus connu est celui proposé par Cooper (12 minutes de course à pied) il y a plus de 50 ans.
- **les tests dits “triangulaires”** d’intensité progressivement croissante par paliers successifs.

► Les tests rectangulaires

Les tests “rectangulaires” présentent comme avantage indéniable la facilité de leur mise en œuvre. Il suffit d’un parcours plat avec un bon revêtement. L’utilisation d’une piste n’est plus indispensable depuis qu’il est possible, en utilisant un CFM avec GPS intégré, de connaître à quelques dizaines de mètres près la distance parcourue sur un temps donné et donc la vitesse moyenne du parcours, ainsi que la valeur de la fréquence cardiaque maximale (FC max) relevée sur les derniers mètres. Actuellement, c’est le test sur 6 minutes ou “semi-Cooper” qui est le plus utilisé. Plusieurs travaux comparatifs montrent qu’il permet une estimation “correcte” de la VMA à partir de la vitesse moyenne du parcours et de la FC max. Ce test présente néanmoins une importante limite. Le sujet doit être préalablement entraîné à la course à pied afin de bien maîtriser son allure en dosant parfaitement son accélération de façon à terminer la dernière minute sans être épuisé mais en donnant le maximum.

► Les tests triangulaires

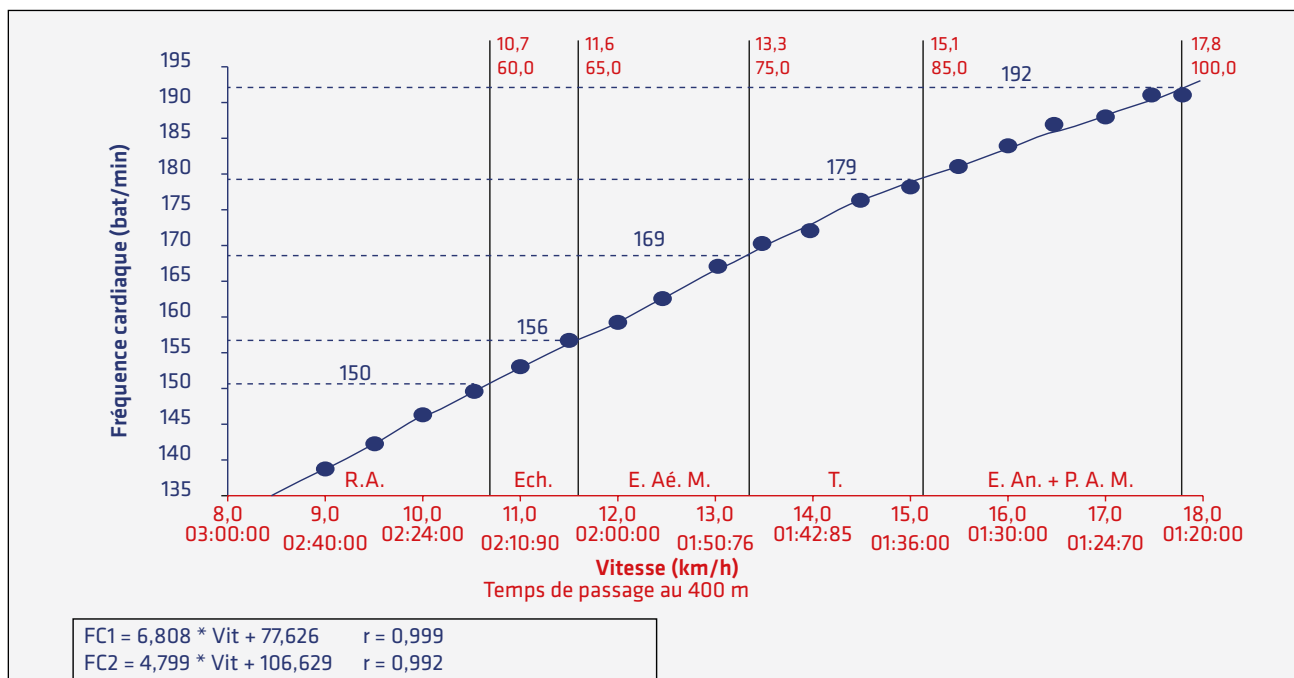
Les tests progressifs “triangulaires” ont valeur de référence car ils ont été scientifiquement validés sur piste d’athlétisme par des physiologistes de l’exercice musculaire de renom. Le test le plus connu est le test Vameval de Cazorla-Léger. Sa progressivité est similaire aux proto-



© Casarsa - iStock

L’intérêt des tests de terrain est leur reproductibilité dans le temps permettant au sujet de se comparer à lui-même et de noter les effets d’un programme d’entraînement.

coles de type rampe sur tapis roulant réalisés en laboratoire. Il se pratique sur une piste de 400 m avec une augmentation de la vitesse de 0,5 km/h toutes les minutes. Il nécessite une certaine logistique avec notamment l’utilisation de plots séparés de 20 m chacun tout au long du tour de piste. Il est donc plutôt réservé aux athlètes en club avec la participation d’une équipe de coaching. Dans toutes les études comparatives, ce test se retrouve en tête en termes de validité scientifique et de fidélité des mesures. Pour le sportif amateur, qui ne peut disposer d’une telle logistique, il faudra donc utiliser un test certainement moins précis mais plus simple à réaliser. L’idéal étant de pouvoir utiliser un test en prenant une pente d’accélération similaire au Vameval. Cela devient maintenant possible grâce à l’utilisation d’un CFM avec GPS intégré de dernière génération qui possède un temps de réponse très bref pour réactualiser la vitesse de course. Ce compteur précis des indices temps et vitesse permet donc de s’affran-



>>> Figure 1 - Exemple de test Vameval sur piste avec recueil de la FC avec un cardiofréquencemètre et définition des zones d'entraînement (d'après Cazorla et al.).

Ech : échauffement ; E. Aé. M : endurance aérobie modérée (équivalent d'un travail en dessous du premier seuil) ; T : zone transitionnelle.

chir d'une piste et de le réaliser par exemple sur une piste cyclable ou sur un chemin de randonnée en ligne droite (à la condition d'un revêtement de sol correct). Le test doit se pratiquer sur un parcours plat de 2 000 à 2 500 m pour les meilleurs après une phase d'échauffement de 5 minutes et en accélérant progressivement toutes les minutes de 0,5 km/h et ce, jusqu'à épuisement. La FC max sera la valeur trouvée au moment de l'arrêt, la VMA sera celle affichée sur la montre GPS sur le dernier palier de 1 minute terminé.

La principale limite méthodologique de ce test est que le dernier palier de vitesse est souvent, surtout chez les sportifs très volontaires, réalisé en puisant une part de l'énergie nécessaire dans les filières énergétiques anaérobies. Dans ce cas, le plateau de VO_2 max est en réalité atteint à l'avant-dernier palier, la vitesse maintenue sur le dernier palier peut donc, dans ces cas, surestimer la VMA du sujet. Il est

donc recommandé de contrôler cette vitesse dans les 3 jours qui suivent lors d'un test complémentaire qui consiste, après un échauffement bien réalisé, à courir le plus longtemps possible à la vitesse déterminée lors du test triangulaire. Si le coureur ne peut pas maintenir cette vitesse plus de 3 minutes, la VMA a donc été surévaluée lors du test et il faut alors prendre comme repère la vitesse du palier précédent. Le temps limite de soutien d'une VMA varie de 5 à 7 minutes maximum selon les individus.

► Les tests pour les cyclistes

Pour les cyclistes, peu de tests ont été scientifiquement comparés aux épreuves de laboratoire. Toujours en utilisant un CFM avec GPS, un protocole comparable au test triangulaire précédent peut être réalisé. Cependant, à moins de posséder un capteur de puissance sur le vélo, le seul paramètre qui sera utilisable ensuite sera la FC max individuelle

recueillie à la fin de l'épreuve. En effet, la vitesse en vélo ne permet pas d'évaluer la puissance instantanée développée et ne pourra donc être utilisée en tant que telle. En revanche, si un capteur de puissance est disponible, la puissance relevée au dernier palier pourra tout à fait servir de référence en tant que puissance maximale aérobie (PMA) du sujet.

LES PARAMÈTRES RECUEILLIS

LES INDICES MAXIMAUX

Lors d'un test sur le terrain, les indices "maximaux" (FC max, VMA, PMA) sont les seuls à être mesurables directement.

LES INDICES INTERMÉDIAIRES

Les indices intermédiaires, permettant de qualifier le niveau d'endurance et de définir des plages d'in-

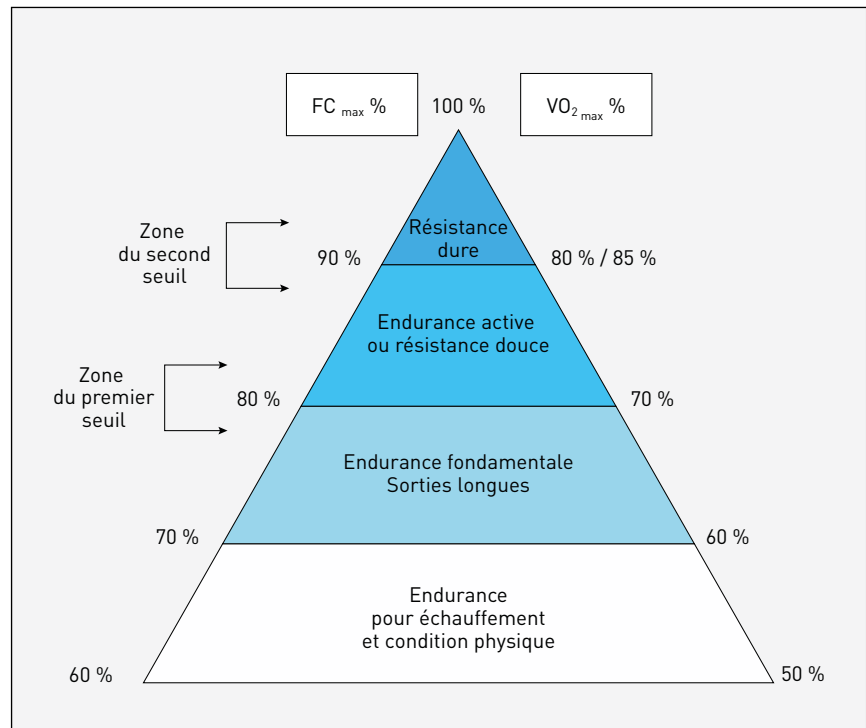
tensité d'entraînement, peuvent être déterminés par une analyse fine de la pente de progression de la FC lors d'un test Vameval (Fig. 1), la rupture de pente ayant été assimilée par Conconi comme le niveau du second seuil (dénommé aussi seuil anaérobie). Cette hypothèse ayant depuis été remise en question et compte tenu de la lourdeur logistique de cette détermination, le plus simple sera donc d'extrapoler les valeurs du premier et du second seuils à partir des valeurs maximales recueillies lors du test de terrain. Les zones d'entraînement seront établies sur la base d'un pourcentage de FC max ou éventuellement d'un pourcentage de la VMA pour les réfractaires à l'utilisation d'un CFM (Fig. 2). Le premier seuil se trouvant classiquement entre 70 et 75 % de la FC max pour le sujet débutant ou peu entraîné, ce pourcentage pouvant monter à 80, voire 85 % de la FC max pour les plus entraînés et endurants. Certes, ces données extrapolées seront moins précises que si elles avaient été déterminées de façon directe lors d'un test en laboratoire. Il s'agit là d'une limite indiscutable des tests de terrain.

CONCLUSIONS

L'intérêt et la limite principaux des tests de terrain peuvent être résumés.

INTÉRÊTS

L'intérêt majeur de ces tests est leur reproductibilité dans le temps ce qui permet au sujet de se comparer à lui-même et de noter les effets d'un programme d'entraînement. Ce test peut aussi prendre le relais d'un test de laboratoire et éviter ainsi des réévaluations en laboratoire plus contraignantes et plus coûteuses. Il peut aussi compléter les données de laboratoire notam-



>>> Figure 2 - Détermination par extrapolation des zones d'entraînement au niveau des deux seuils "aérobie" et "anaérobie". Le pourcentage de la FC max est le repère le plus facile à exploiter par l'utilisation d'un cardiofréquencemètre.

ment après un test réalisé sans mesure directe du VO_2 max, pour s'assurer que la vitesse atteinte au dernier palier n'est pas sur- ou sous-estimée. Il s'agira alors d'un test "rectangulaire" sur piste ou le sujet devra tenir le plus longtemps possible cette vitesse. Il s'agit du temps limite (T_{lim}) mis au point par Véronique Billat. Si la durée de maintien est inférieure à 3 minutes, la VMA est surestimée par le test, et si elle est supérieure à 6 minutes elle a été sous-estimée.

INCONVÉNIENTS

L'inconvénient du test de terrain reste celui d'un examen sans contrôle médical et électrocardiographique, d'une évaluation "indirecte" de la capacité aérobie et des "seuils", une mesure de l'économie de course im-

possible, une estimation de la VMA ou de la PMA qui peut être sous- ou sur-évaluée selon les sujets. Ces derniers inconvénients sont actuellement gommés par la commercialisation d'appareils de mesure de VO_2 portables, mais qui restent encore réservés à la recherche ou aux sportifs de haut niveau.

AU FINAL

Le test de terrain reste l'outil de choix pour le sportif jeune, pour l'évaluation des sports collectifs mais aussi pour compléter et relayer le test de laboratoire pour le suivi de l'entraînement. La récente commercialisation des CFM avec GPS accéléromètres et capteurs d'activité permettent de simplifier encore l'approche et la réalisation de ces tests.