

# ERGOSPIROMÉTRIE EN PRATIQUE MÉDICALE

B. LANGE (1), P. CLOSE (2), TH. BURY (3)

**RÉSUMÉ :** L'épreuve d'effort cardio-pulmonaire permet une évaluation précise d'un sujet soumis à une situation de contrainte. Elle s'avère très utile dans de nombreux domaines, tels que la clinique, la médecine du sport, la réadaptation à l'effort, la recherche et les essais thérapeutiques. L'ergospirométrie permet souvent de juger de la présence d'une pathologie dominante, soit cardiaque, soit respiratoire ou encore d'évaluer le potentiel aérobie d'un sportif. Elle fournit de nombreuses données physiologiques, en particulier la mesure de la consommation maximale d'oxygène (VO<sub>2</sub> max) ainsi que la détermination du seuil anaérobie. Même si différentes méthodes d'effort peuvent être envisagées, le cyclo-ergomètre est reconnu actuellement comme étant le matériel d'effort à conseiller en général et à choisir pour une standardisation des épreuves.

## INTRODUCTION

L'exercice physique est une situation de contrainte obligeant l'individu à coordonner la mise en jeu de ses réserves cardiaques, respiratoires, musculaires et psychologiques. L'épreuve d'exercice musculaire permet donc de tester précocement la réalité d'un handicap et d'analyser chacun des maillons de la chaîne de transport de l'oxygène. Cette analyse intégrée des possibilités d'adaptation à l'exercice physique permet souvent de juger de la part respective des limitations cardio-circulatoires, respiratoires et musculaires. L'interprétation d'une épreuve d'exercice musculaire reste cependant délicate au-delà des situations caricaturales où la limitation est strictement cardiaque ou respiratoire.

Elle nécessite, de manière élémentaire, de se référer à la "normalité" de chaque paramètre mesuré qui varie avec l'âge, le poids ou le niveau d'activité physique. Elle nécessite, en définitive, une connaissance précise de la physiologie de l'exercice et des conséquences fonctionnelles des maladies afin de proposer une interprétation physiopathologique de la limitation à l'exercice. Les principales indications d'un test d'effort sont les suivantes.

1. Démontrer s'il existe une gêne respiratoire compatible avec les plaintes du sujet. En effet, la dyspnée est une sensation subjective dont l'expression varie selon les sujets et dont les origines sont multiples.

(1) Assistante, (2) Assistant volontaire, (3) Chargé de Cours, Université de Liège, Service de Physiologie humaine et de l'Effort physique.

## EXERCISE TESTING IN RESPIRATORY MEDICINE

**SUMMARY :** Cardiopulmonary exercise testing is a unique tool to assess the limits and mechanisms of exercise tolerance. It is also useful for establishing the profiles and adequacy of the responses of the systems at submaximal and maximal exercises. The measure of VO<sub>2</sub> max (maximal oxygen uptake) has become the "benchmark" to quantify cardiovascular functional capacity and aerobic fitness.

**Keywords :** Effort test - Material - Maximal oxygen uptake

2. Rechercher les facteurs limitatifs de l'effort physique et ainsi orienter le médecin vers une étiologie essentiellement pulmonaire ou essentiellement cardiaque, voire circulatoire périphérique.

3. Préciser un diagnostic, comme par exemple un asthme d'effort, par l'analyse des variables respiratoires avant, pendant et après cet exercice.

4. Évaluer les effets d'un traitement (par exemple, l'intérêt de différentes molécules dans la prévention du bronchospasme d'effort).

5. Servir de base pour programmer le réentraînement à l'effort de patients souffrant de BPCO ou de cardiopathie.

6. Mesurer la consommation d'oxygène d'un individu afin de quantifier son niveau de condition physique.

7. Certains auteurs estiment aussi que l'épreuve d'effort a sa place dans le bilan préopératoire de la chirurgie thoracique afin de mieux apprécier le risque lié au geste opératoire.

Devant la pluralité de ces objectifs, il va sans dire que le test d'effort doit être modulable en fonction du but recherché spécifiquement chez le sujet testé.

Dans cet article, nous rappelons de façon schématique la méthodologie de réalisation d'un test d'effort puis nous discutons de la pertinence de cette évaluation chez le sportif.

## MÉTHODOLOGIE

### a) Les ergomètres

Le cyclo-ergomètre ou le tapis roulant, permet de réaliser un effort quantifiable et de mesurer un nombre important de paramètres.

- Cyclo-ergomètre : il permet de réaliser des efforts d'intensité variable, généralement en position assise. Pour des raisons de commodité, il est recommandé de choisir une bicyclette à

freins électromagnétiques et programmable, ce qui permet, à partir de consignes pré-établies (puissance initiale, augmentation de puissance et durée des paliers), de réaliser des protocoles de façon automatique.

- Tapis roulant : la marche sur tapis roulant peut apparaître plus naturelle que le pédalage sur cyclo-ergomètre. Elle permet une mesure de quasi tous les paramètres cardio-respiratoires. Il est également possible d'adapter la charge de travail en modifiant la vitesse de déroulement ou la pente du tapis roulant. Hormis le coût d'achat plus élevé, les inconvénients du tapis roulant sont le bruit, la difficulté de mesure et de quantification de l'effort en terme de travail fourni (parce que ce dernier dépend du poids du sujet).

#### b) Protocoles d'effort

Ils sont très nombreux, à la limite, chaque laboratoire a son propre protocole. Le besoin de standardisation est donc évident et actuellement possible car de nombreux travaux ont permis de dégager les grandes lignes d'une rationalisation (1-3).

A l'heure actuelle, il existe essentiellement deux types principaux de protocole d'effort sur cyclo-ergomètre :

- l'épreuve d'effort à charge constante, dite "épreuve rectangulaire" qui permet d'atteindre un état stable (équilibre entre l'apport énergétique et les besoins métaboliques) pour une charge inférieure au seuil anaérobie;

- l'épreuve d'effort avec une augmentation progressive de la charge, soit à chaque minute (épreuve triangulaire), soit à des intervalles de temps plus longs (deux minutes ou plus) (épreuve par paliers).

Les épreuves à charge constante s'avèrent plus utiles dans le domaine de la recherche en physiologie que dans celui de la pratique médicale. En effet, ce type d'épreuve n'aide généralement pas au diagnostic mais peut s'avérer utile pour quantifier le handicap fonctionnel d'un sujet à l'exercice en terme d'endurance : durée maximale tolérée de l'épreuve à une charge constante limitative (supérieure au seuil anaérobie).

La méthode qui paraît le mieux acceptée par le patient ou le sportif, et qui permet probablement le meilleur suivi des paramètres, est l'épreuve de type triangulaire progressive et maximale : c'est donc ce type d'épreuve qui doit être conseillé pour une standardisation. Il est important de limiter la durée de l'épreuve à environ dix minutes afin que le sujet n'interrompe pas de façon prématurée l'exercice pour

cause d'inconfort ou d'exaspération. Pour respecter cette règle de dix minutes, il suffit de prédire approximativement la charge maximale que peut atteindre le patient, compte tenu de son état et de son âge, et d'en déduire l'augmentation de charge à chaque palier d'une minute. Par ailleurs, dans le décours de l'effort, il est important que le sujet maintienne une vitesse de pédalage constante : à ce propos, plusieurs travaux ont montré que la fréquence de pédalage de 60 tours par minute permet d'obtenir les plus hautes valeurs de consommation d'oxygène.

#### c) Paramètres évaluables à l'effort

Avant de réaliser une épreuve d'effort, il est bien entendu nécessaire de pratiquer un examen clinique, un électrocardiogramme et une spirométrie. L'examen clinique et l'ECG permettront de dépister certaines contre-indications à la réalisation de cette épreuve; quant à la spirométrie, elle permet de détecter certaines pathologies respiratoires qui justifient une adaptation de la puissance mais elle permet également le calcul de la ventilation maximale théorique.

Les principaux paramètres étudiés (3) sont les suivants :

- mesure de la ventilation minute ( $V_E$ ) : le débit aérien est la première dérivée du volume en fonction du temps. La mesure des débits aériens se fait généralement en utilisant un pneumotachographe et un manomètre différentiel électronique dont le signal est proportionnel au débit.

- analyse des gaz expirés : il est aisé de calculer la consommation d'oxygène et le rejet de  $CO_2$  à partir de la concentration des gaz expirés et de la ventilation. Les analyseurs utilisés actuellement sont des analyseurs rapides permettant de prélever les gaz expirés à la bouche et de faire des mesures "cycle par cycle", approchant ainsi, d'une manière extrêmement précise, les échanges gazeux au niveau pulmonaire (4).

- oxymétrie : les oxymètres permettent la mesure de la saturation du sang artériel de manière non invasive. Il s'agit d'une méthode de mesure photométrique basée sur une différence d'absorption de lumière entre l'hémoglobine et l'oxyhémoglobine. Ce type de mesure permet d'exclure une anomalie majeure des gaz du sang comme facteur limitatif de l'effort, sans devoir recourir à la ponction artérielle.

- électrocardiogramme : il est indispensable de suivre le tracé électrocardiographique et la

pression artérielle dans le décours de l'effort puisque ces éléments peuvent impliquer l'arrêt de l'épreuve, en particulier lorsque surviennent des symptômes ECG ou cliniques d'ischémie.

- paramètres calculés : le recueil des différents paramètres précités permet le calcul de la consommation d'oxygène, du quotient respiratoire ( $R = VCO_2 : VO_2$ ), ainsi que les équivalents respiratoires pour l'oxygène ( $V_E : VO_2$ ) et pour le  $CO_2$  ( $V_E : VCO_2$ ). Des investigations plus poussées peuvent être réalisées par la mise en place d'un cathéter artériel ou d'une sonde de Swan-Ganz. De plus, en cas de suspicion d'asthme d'effort, des mesures spirométriques peuvent être réalisées dans le décours de l'effort physique.

L'interprétation des résultats du test d'effort s'effectue à l'aide d'algorithmes d'interprétation (3, 5, 6).

#### PERTINENCE DE L'ÉVALUATION PHYSIOLOGIQUE DE LA PUISSANCE AÉROBIE CHEZ LE SPORTIF

Au cours d'un exercice physique, l'énergie requise par la contraction musculaire est obtenue de trois sources métaboliques interdépendantes :

- 1) l'hydrolyse des liens riches en énergie de l'ATP et l'hydrolyse de la phosphocréatine,
- 2) la glycolyse qui convertit, par voie anaérobie, les sucres en acide pyruvique et en acide lactique,
- 3) la production aérobie d'énergie par oxydation de l'acide pyruvique et des graisses.

Ces trois processus métaboliques peuvent être impliqués simultanément lors d'une activité physique et la proportion relative d'énergie que chacun de ces processus fournit varie en fonction de l'intensité de l'exercice réalisé. La *puissance aérobie maximale* est ainsi la quantité maximale d'oxygène qu'un individu peut utiliser par unité de temps au cours d'un exercice musculaire intense et d'une durée égale ou supérieure à quatre minutes. Elle correspond donc au volume d'oxygène consommé par minute au cours d'un effort maximal ( $VO_2 \text{ max}$ ). De façon didactique, on considère habituellement que les valeurs de  $VO_2 \text{ max}$  mesurées chez les adultes (20 - 30 ans) sains, sont comprises entre 40 et 90 ml/min/kg chez l'homme; ces valeurs sont de 10-15 % inférieures chez la femme. Elles sont déterminées essentiellement par trois facteurs : le potentiel génétique, l'activité physique et l'âge. L'expression de la  $VO_2 \text{ max}$  en millilitre d'oxygène par kilogramme de poids corporel est aisée et permet des compa-

raisons entre différents athlètes. En toute rigueur scientifique, il serait préférable de rapporter cette  $VO_2$  à la "masse cellulaire active" déterminée, par exemple par dilution isotopique. L'expérience montre cependant que l'approximation du poids corporel suffit et c'est donc elle qui est le critère couramment utilisé chez le sujet sain. De nombreux travaux scientifiques ont montré que la puissance aérobie est un facteur déterminant pour les activités d'endurance, qu'elles soient intermittentes ou soutenues. Ainsi, les valeurs de  $VO_2 \text{ max}$  les plus élevées sont obtenues dans les sports suivants : course de demi-fond, ski de fond, aviron, cyclisme. A l'heure actuelle, il n'est pas possible de déterminer de façon précise ce qui, dans la puissance aérobie élevée de tels athlètes, est attribuable à l'entraînement plutôt qu'au patrimoine génétique. Il a toutefois été régulièrement démontré que des adultes jeunes, peu entraînés pouvaient augmenter de 20 à 25 % leur puissance aérobie, selon leur niveau de départ, par un entraînement régulier bien conduit, de type aérobie (7).

Il est également connu que chez les athlètes qui s'entraînent, l'acide lactique commence à s'accumuler dans le sang à des intensités de travail requérant moins que la consommation maximale d'oxygène. Bien que les explications de ce phénomène varient beaucoup, l'analyse la plus simple montre que ce phénomène résulte d'un déséquilibre entre les quantités d'acide lactique produites par certaines fibres musculaires qui se contractent en condition anaérobie, et la capacité de l'organisme à métaboliser l'acide lactique ou à s'en débarrasser. Au fur et à mesure qu'augmente l'intensité de l'exercice, le déséquilibre s'accroît, entraînant une accumulation accrue de lactates dans le sang. Le développement de puissance pour lequel, durant un exercice d'intensité croissante, les niveaux sanguins d'acide lactique s'élèvent de façon significative au-dessus des niveaux normaux de repos, est représenté par l'expression classique : "seuil anaérobie" ou encore par l'expression "seuil d'inadaptation ventilatoire". Sur le plan physiologique, elle correspond à la deuxième cassure observée dans la relation entre la ventilation et la puissance (ou consommation d' $O_2$ ) (8, 9). Il est généralement reconnu que ce seuil anaérobie est un facteur critique chez l'athlète, influençant la détermination de son potentiel à soutenir des exercices physiques prolongés, à un pourcentage élevé de sa  $VO_2 \text{ max}$ . Ce seuil est également souvent corrélé, dans les milieux sportifs, avec un taux de lactate de 4 mM/l. Il est aussi connu que le seuil anaérobie peut être

relevé via un entraînement régulier et que les athlètes qui ont du succès dans les épreuves de longue distance ont des seuils anaérobies significativement plus élevés que les individus normaux. Le seuil anaérobie est donc un paramètre important à mesurer chez l'athlète qui pratique un sport d'endurance mais les techniques de mesure et l'interprétation des résultats posent certains problèmes (10).

*But de l'évaluation de la puissance aérobie*

Une évaluation périodique et régulière de la puissance aérobie permet de déterminer chez le sportif :

- 1) l'affinité d'un athlète pour certains types d'activités sportives ou pour un rôle spécifique dans une activité sportive donnée;
- 2) le type d'entraînement aérobie qui devrait être utilisé;
- 3) l'effet d'un entraînement spécifique sur la puissance aérobie maximale;
- 4) le rythme de progrès de l'athlète ou le taux de changement produit par l'entraînement;
- 5) le rythme auquel un athlète devrait travailler en compétition;
- 6) la diminution possible des capacités d'un athlète suite à des facteurs d'ordre médical, nutritionnel ou de croissance.

*Méthodes d'évaluation*

Il existe différentes méthodes d'évaluation de la puissance aérobie maximale, soit à l'aide de tests de laboratoire (cf. point 2), soit à l'aide de tests de terrain. Nous renvoyons à ce propos le lecteur à des ouvrages spécifiques (9-11).

En laboratoire, l'obtention de la VO<sub>2</sub> max est assurée lorsqu'on observe un plafonnement de la VO<sub>2</sub> en dépit d'une nouvelle augmentation de charge. D'autres informations utilisées comme critère pour établir l'obtention de valeurs fiables de VO<sub>2</sub> max incluent l'épuisement, l'atteinte de la valeur maximale prévisible de la fréquence cardiaque en fonction de l'âge, une valeur de quotient respiratoire excé-

dant 1,1 et un taux de lactates plasmatiques au-dessus de 9 mM/l.

La valeur de VO<sub>2</sub> max est souvent exprimée par rapport au poids corporel (ml/min/kg).

La classification proposée par Flandrois et Lacour (tableau I) de l'aptitude aérobie en fonction de la VO<sub>2</sub> max reste d'utilisation chez le sujet jeune, en bonne santé (12).

Les valeurs de la littérature concernant l'athlète endurant sont, bien sûr, encore plus élevées (> 70 ml/kg/min) (13). A côté de la mesure de VO<sub>2</sub> max, le deuxième critère classique pour juger de l'aptitude physique du sportif est la détermination du seuil anaérobie. Quels que soient la méthode et les critères retenus pour détecter ce seuil, sa détermination permet deux applications pratiques dans la préparation de l'athlète : d'une part la prédiction du niveau de performance, donc l'état d'entraînement; d'autre part la prescription de la puissance optimale d'entraînement. Dans ce contexte, un seuil anaérobie correspondant à une lactatémie de 4 mM/l est souvent utilisé pour déterminer la puissance d'entraînement car, à ce niveau d'effort, la lactatémie est stable lors de l'exercice prolongé (14).

**CONCLUSION**

Actuellement, en pratique médicale courante, nous pensons que l'ergospirométrie est sous-utilisée. L'étude du comportement cardio-respiratoire dans un laboratoire d'effort permet pourtant, au minimum de conseiller le patient ou le sportif amateur dans ses activités en lui faisant courir le moins de risques tout en lui apportant un maximum de confort. Par ailleurs, l'évolution actuelle de la pratique sportive impose des exigences athlétiques sans cesse croissantes; cette évolution implique, en théorie, un suivi rigoureux de la condition physique pour tous les sportifs en quête de performance.

**RÉFÉRENCES**

1. Mc Kay G, Banister E.— A comparison of maximum oxygen uptake determination of bicycle ergometry at various pedaling frequencies and by treadmill running at various speeds. *Eur J Appl Physiol*, 1976, **35**, 191-200.
2. Loiseau A, Deanjean A, Lachman A.— C.R.E.D.O : L'épreuve d'effort en pneumologie. *Rev Mal Resp*, 1992, **9**, 287-294.
3. ERS Task Force on Standardization of clinical exercise testing.— Clinical exercise testing with reference to lung diseases : indications, standardization and interpretation strategies. *Eur Respir J*, 1997, **10**, 2662-2689.
4. Iamamoto Y, Takei Y, Mokushi K, et al.— Breath by breath measurement of alveolar gaz exchange with a

TABLEAU I. APTITUDE AÉROBIE EN FONCTION DE LA VO<sub>2</sub> MAX (CLASSIFICATION SELON FLANDROIS ET LACOUR)

VO <sub>2</sub> max (ml/min/kg)	Aptitude physique
30-35	médiocre
35-40	mauvaise
40-45	moyenne inférieure
45-50	moyenne supérieure
50-55	bonne
55-60	très bonne
> 60	excellente

- slow-response gas analyser. *Med Biol Eng Comput*, 1987, **25**, 141-146.
5. Wasserman K, Hansen J, Darryl Y, Whipp B.— *Principles of exercise testing and interpretation*. Lea and Febiger, ed. Philadelphia, 1987.
  6. Eschenbacher W, Mannina A.— An algorithm for the interpretation of cardiopulmonary exercise test. *Chest*, 1990, **97**, 263-267.
  7. Pollock ML.— The quantification of endurance training programs. *Exerc Sports Sci Rev*, 1973, **1**, 155.
  8. Wasserman K.— Breathing during exercise. *New Engl J Med*, 1978, **298**, 780-785.
  9. Myers J, Ashley E.— Dangerous curves. A perspective on exercise, lactate and the anaerobic threshold. *Chest*, 1997, **111**, 787-795.
  10. Thoden J, Wilson B, Mac Dougall J.— Evaluation de la puissance aérobie, in *Evaluation physiologique de l'athlète de haut niveau*. Ed Décarie-Vigot, Lausanne, 1988, 53-73.
  11. Oldridge N.— Assessment, determinants and adjuvants, in *Physical activity, Fitness and health*. Ed Human Kinetics Publishers, Toronto, 1994, 145-202.
  12. Flandrois R, Lacour JR.— Les adaptations respiratoires et circulatoires de l'exercice musculaire, in *Précis de physiologie*, Herman. Vol IV. Masson, Paris, 1976, 2<sup>e</sup> ed, 501-536.
  13. Bouchard C, Dionne F, Simoneau JA, Boulay M.— Genetics of aerobic and anaerobic performances. *Exerc Sports Sci Rev*, 1992, **20**, 27-58.
  14. Kindermann W, Simon G, Keul J.— The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol*, 1979, **42**, 25-34.

Les demandes de tirés à part sont à adresser au Pr. T. Bury, Service de Pneumologie, CHU Sart Tilman, 4000 Liège.