

L'essentiel sur la VO_2 en cardiologie

RÉSUMÉ : L'épreuve d'effort couplée à l'analyse des échanges respiratoires reste le moyen le plus fiable pour déterminer la capacité à l'effort d'un sujet. En cardiologie, cet examen reste incontournable dans deux populations "opposées" : le patient insuffisant cardiaque et le sportif d'endurance de haut niveau.

- Chez le patient insuffisant cardiaque, le pic de VO_2 , la pente VE/VCO_2 et la puissance circulatoire (produit de la pression artérielle systolique et de la consommation d'oxygène au maximum de l'effort) sont les principaux paramètres pronostiques. Le premier seuil ventilatoire est un indice très informatif sur la qualité de vie des patients.

- Chez le sportif de haut niveau, cet examen permet de sélectionner les plus jeunes en fonction de leurs capacités d'endurance, d'explorer une symptomatologie inhabituelle, de calibrer et de mesurer les effets de l'entraînement des athlètes.



→ J.Y. TABEL^{1,2}, P. MEURIN¹,
F. BEAUVAIS²,
A. COHEN-SOLAL²

1. Les Grands Prés, Centre de Réadaptation Cardiaque de la Brie (CRCB), VILLENEUVE-SAINT-DENIS.

2. INSERM U942, Service de Cardiologie, Hôpital Lariboisière, Faculté de Médecine Paris Diderot, PARIS.

La réalisation d'une épreuve d'effort couplée à l'analyse des échanges respiratoires permet une étude précise et objective des capacités d'effort d'un sujet. La relation qui lie l'intensité de l'effort fourni (exprimé en watts ou en METS) et la consommation d'oxygène nécessaire pour fournir cet effort (c'est-à-dire le coût énergétique) sont connues chez le sujet "sain". La consommation maximale d'oxygène (ou VO_2 max) peut donc être prédite de manière relativement fiable dans cette population, à partir d'une épreuve d'effort maximale ou sous maximale sans mesure directe des échanges gazeux (lors d'une épreuve d'effort sous maximale, la fréquence cardiaque maximale est alors estimée et non mesurée). Par exemple, la formule de Hawley : VO_2 max = $0,01141 \times PMA + 0,435$ permet d'évaluer la VO_2 max d'un sujet sain à partir de la puissance maximale développée exprimée en watts.

Les différences observées dans cette population de sujets sains entre la VO_2 max estimée et mesurée sont faibles et n'ont pas de conséquence clinique. En revanche, le coût énergétique est

éminemment variable chez le patient insuffisant cardiaque [1] et chez le sportif de haut niveau. Dans ces deux populations "extrêmes" d'une part, la prédiction de la VO_2 max est peu fiable et, d'autre part, une imprécision de mesure peut avoir des conséquences importantes.

>>> **Chez le patient insuffisant cardiaque**, une évaluation précise de la tolérance à l'effort avec mesure de la VO_2 max va permettre une évaluation fonctionnelle et pronostique majeure et également de guider les thérapeutiques et d'en mesurer les effets.

>>> **Chez le patient sportif de haut niveau**, cet examen permet de sélectionner les plus jeunes en fonction de leurs capacités d'endurance, d'explorer une symptomatologie inhabituelle, de calibrer et de mesurer les effets de l'entraînement des athlètes.

[Réalisation pratique

La mesure des échanges respiratoires est réalisée au cours d'une épreuve d'effort.

REVUES GÉNÉRALES

Explorations

Celle-ci peut être réalisée sur tapis (mode d'évaluation le plus utilisé dans les pays anglo-saxons) ou sur cycloergomètre (mode d'évaluation le plus utilisé en France). Le patient réalise une épreuve d'effort dite "triangulaire", c'est-à-dire à charge croissante, utilisant un incrément de charge adapté aux patients: par exemple, un incrément de 10 W/min chez le patient insuffisant cardiaque suivi d'une période de récupération. Chez le sportif, le test d'effort doit être autant que possible réalisé dans les conditions les plus proches de son entraînement. L'analyse des échanges respiratoires se fait par l'intermédiaire d'un embout buccal ou d'un masque relié à un analyseur.

L'épreuve d'effort doit être maximale, c'est-à-dire "épuisante" pour le patient, si on veut obtenir le maximum d'informations fonctionnelles et pronostiques. Une épreuve sous maximale peut être suffisante dans certains cas, si l'épreuve d'effort est réalisée par exemple pour déterminer l'intensité des séances de réadaptation. Enfin, le personnel doit être formé à la technique et l'équipement de qualité parfaite, calibré soigneusement entre chaque test.

Interprétation des indices tirés de l'épreuve d'effort avec mesure des échanges respiratoires

1. Le pic de VO_2

● Interprétation

La valeur maximale de la VO_2 recueillie lors d'une épreuve d'effort est un témoin de la capacité maximale d'un patient à l'effort. Le plus souvent on obtient un pic de VO_2 et non la " VO_{2max} " qui implique un plateau de la courbe de consommation d'oxygène au maximum de l'effort, c'est-à-dire une stagnation de la consommation d'oxygène alors que l'intensité de l'effort demandé augmente. Il existe de nombreux déterminants cardiaques

et périphériques, et les facteurs limitants de l'augmentation de la VO_2 varient d'un patient à l'autre :

- **chez un sportif ou chez un sujet sain**, le facteur limitant de la VO_{2max} est l'augmentation du débit cardiaque ;
- **chez un patient insuffisant cardiaque ou très déconditionné**, les facteurs limitants seront d'une part l'augmentation du débit cardiaque à l'effort et, d'autre part, le déconditionnement périphérique.

L'importance du déconditionnement chez les patients insuffisants cardiaques explique notamment la très mauvaise corrélation existante entre la tolérance à l'effort et les indices de fonction systolique tels que la fraction d'éjection ventriculaire

gauche [2, 3]. Inversement, l'amélioration de la performance cardiaque n'améliore pas nécessairement de façon parallèle la tolérance à l'exercice [4].

L'utilisation de la VO_2 chez l'insuffisant cardiaque permet également d'évaluer les bénéfices sur la tolérance à l'effort des différentes thérapeutiques. Chez un sujet sain, le pic de VO_2 normal se situe entre 30 et 35 mL/kg/min. Ce chiffre est abaissé chez l'insuffisant cardiaque compris le plus souvent entre 10 et 20 mL/kg/min. Inversement, il est augmenté chez le sportif d'endurance, pouvant atteindre 70 à 80 mL/kg/min chez les marathoniens ou les cyclistes de très haut niveau (fig. 1, 2, 3).

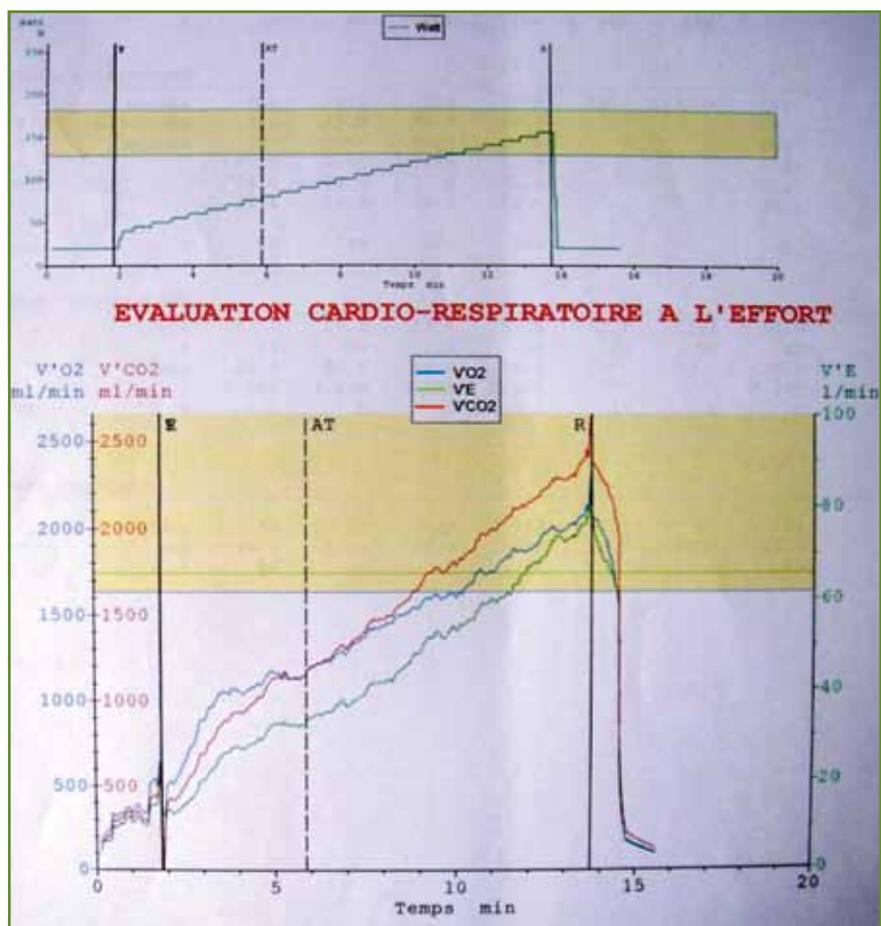


Fig. 1: VO_2 normale. Homme 60 ans. Épreuve d'effort négative à 170 W et 95 % de la FMT. Pic VO_2 27 mL/kg min, soit 98 % de la théorique. SV_1 12 mL/kg/min.

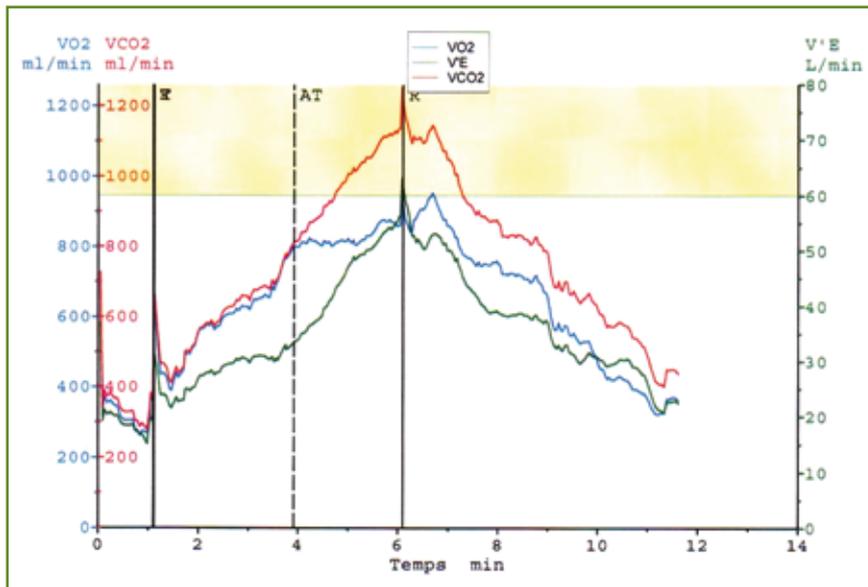


FIG. 2 : VO_2 d'un patient insuffisant cardiaque mesuré à 12 ml/kg/min, soit 45 % de la théorique. $SV_1 = 10$ mL/kg/min.

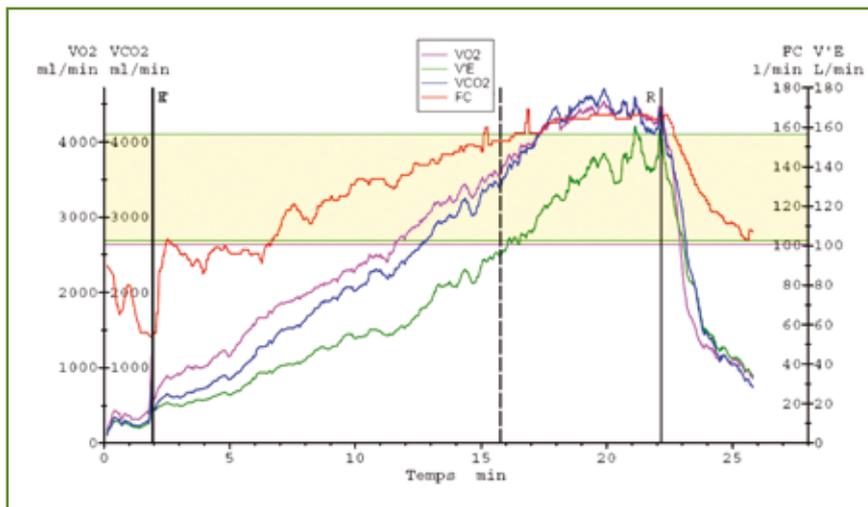


FIG. 3 : Sujet de 31 ans, triathlonien. Pic de VO_2 58 ml/kg/min soit 190 % de la théorique (400 W). $SV_1 = 45$ mL/kg/min. $SV_2 = 52$ mL/kg/min.

● Valeur pronostique

La valeur pronostique du pic de VO_2 est établie depuis de nombreuses années ; depuis la publication princeps de Mancini [5], le seuil de 14 mL/kg/min (ou 50 % des valeurs théoriques [6]) a été longtemps retenu pour inscrire les patients sur la liste de transplantation cardiaque.

Chez les patients recevant un traitement bêtabloquant, les études montrent que la valeur pronostique du pic de VO_2 est conservée mais qu'il faudrait, compte tenu de l'amélioration de leur pronostic sous traitement, revoir les seuils de transplantation à la baisse (le seuil à prendre en considération serait alors compris entre 10 et 12 mL/kg/min [7, 8].

L'évolution de la tolérance à l'effort jugée par l'évolution du pic de VO_2 a également une valeur pronostique : ainsi, l'amélioration au cours des mois du pic de VO_2 est associée à un bon pronostic [9]. De même, l'évolution du pic de VO_2 peut être un marqueur de réponse à un traitement : les patients qui sont dits "répondeurs" à un programme de réadaptation – c'est-à-dire qui améliorent significativement leur pic de VO_2 après un programme de reconditionnement à l'effort – ont un meilleur pronostic comparé aux patients non répondeurs dont le pic de VO_2 est peu modifié [10].

2. Pente VE/VCO_2

La pente d'augmentation de la ventilation (VE) sur le volume expiré de dioxyde de carbone (VCO_2) est un témoin de l'efficacité respiratoire au cours de l'effort, c'est-à-dire la capacité du patient à éliminer le CO_2 pour une ventilation donnée. Cette pente augmente chez le patient insuffisant cardiaque en raison notamment d'une augmentation de l'espace mort ventilatoire (liée en partie à la baisse du débit pulmonaire), à une anomalie des chémorécepteurs aortiques ou à l'existence d'un ergoréflexe musculaire exacerbé. Sa valeur normale est inférieure à 30 %. La relation qui lie la ventilation et la VCO_2 est une relation linéaire.

Plusieurs études ont validé la valeur pronostique de la pente VE/VCO_2 dans l'insuffisance cardiaque, celle-ci étant le plus souvent retrouvée comme supérieure ou égale à celle du pic de VO_2 , notamment chez les patients sous bêtabloquants [11]. Une valeur supérieure à 40 % est associée à un pronostic péjoratif. Ce paramètre a par ailleurs l'avantage de rester valide, même lors d'une épreuve sous maximale.

3. Puissance circulatoire

La puissance cardiaque générée au cours de l'effort est définie comme le produit du débit cardiaque par la pression artérielle moyenne. Mesurée par des techniques

REVUES GÉNÉRALES

Explorations

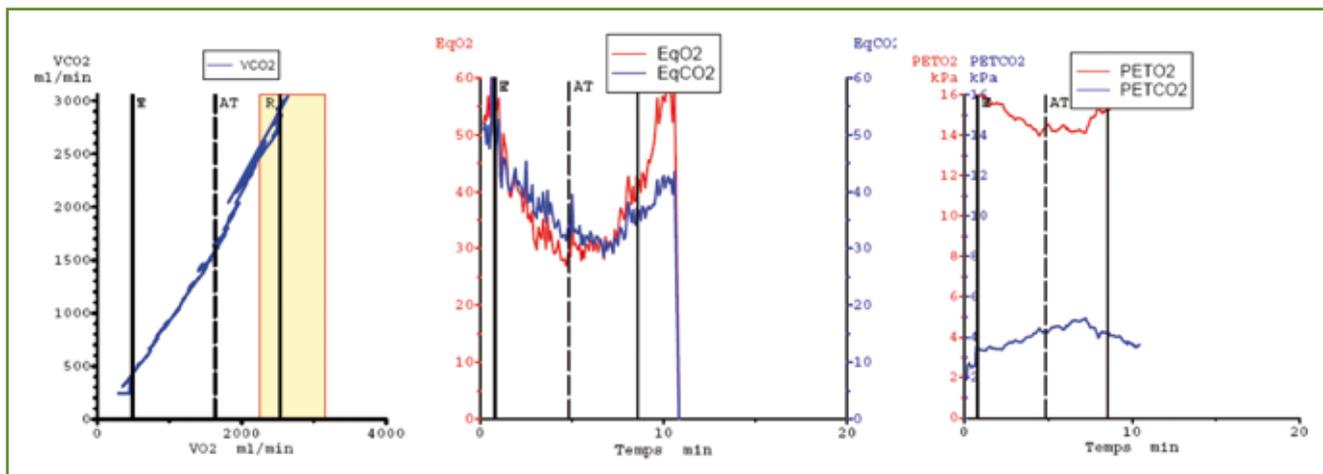


FIG. 4 : Détermination du SV1 = AT (anaerobic threshold).

invasives (et donc peu utilisable en pratique), elle représente un des facteurs pronostiques les plus puissants dans l'insuffisance cardiaque, même comparée au pic de VO_2 [12]. Par analogie, on peut définir la puissance circulatoire maximale comme le produit du pic de VO_2 (débit cardiaque max \times différence artérioveineuse en oxygène maximale (DAVO₂) par la pression artérielle systolique mesurée au maximum de l'effort. Cet indice, qui intègre l'évolution de la postcharge à l'effort, semble avoir une valeur pronostique supérieure à celle du pic de VO_2 .

Une valeur du produit : pic de VO_2 (en mL/min/kg) \times PAS (en mmHg) < 2000 est associée à un taux de mortalité élevé à un an [13]. Ceci confirme une notion ancienne attribuant à l'absence de montée tensionnelle une valeur péjorative chez les coronariens; une absence de montée tensionnelle coexistant avec un pic de VO_2 peu abaissé doit faire suggérer une insuffisance cardiaque sévère, compensée partiellement par une bonne adaptation périphérique (chez un sportif, par exemple).

4. Le seuil ventilatoire 1

Le franchissement du seuil ventilatoire (SV1) au cours de l'effort correspond théoriquement à l'incapacité de l'organisme à produire l'énergie nécessaire à

la réalisation de l'effort par l'utilisation exclusive du métabolisme aérobie. Le complément d'énergie nécessaire à la réalisation de l'exercice est fourni en partie par la glycolyse anaérobie, pour une part croissante à mesure que l'effort augmente. On considère aujourd'hui qu'il s'agit d'une interprétation un peu simpliste des choses, mais la valeur informative du paramètre est toujours importante.

Le SV1 est classiquement déterminé par :
 – l'augmentation de la pente VE/ VO_2 en fonction du temps (ou équivalent en O_2 : EqO₂) sans modification de la pente VE/ VCO_2 en fonction du temps (ou équivalent en CO_2 : EqCO₂);
 – l'augmentation de la pression télé-expiratoire en oxygène (PETO₂) sans modification de la pression télé-expiratoire en CO_2 (PETCO₂);
 – la cassure de la courbe de Beaver (VCO_2/VO_2) avec une augmentation rapide de la VCO_2 en fonction de la VO_2 (fig. 4).

Les valeurs du SV1 et du ratio SV1/ VO_{2max} (normale comprise entre 0,4 et 0,6) reflètent le degré de déconditionnement d'un patient : une valeur basse du SV1 (et du ratio SV1/ VO_{2max}) témoigne d'un déconditionnement périphérique important et donc d'une participation précoce du métabolisme anaérobie au cours de l'effort. C'est le cas des

insuffisants cardiaques et des déconditionnements quelle qu'en soit la cause.

Le SV1 est un indice très informatif sur la qualité de vie des patients. Il permet d'évaluer les efforts réalisables sans dyspnée, fatigue ou douleur musculaire excessive et ainsi de fixer des niveaux d'entraînement. Il reste toutefois souvent difficile à interpréter car il peut être calculé par différentes méthodes, et sa détermination souffre d'une grande variation inter-observatrice. Attention à ne pas confondre seuil non atteint et seuil non déterminable : les implications en sont différentes.

Le franchissement précoce du SV1 (< 11 mL/kg/min) est associé à un pronostic péjoratif. Toutefois, sa valeur pronostique semble moins robuste que celle du pic de VO_2 même si cela reste controversé. Ce paramètre reste utilisable lors d'une épreuve sous maximale.

5. Le seuil ventilatoire 2

Lors d'un effort maximal, la fin de l'effort est marquée par un état d'acidose métabolique lactique compensé par une hyperventilation. Le 2^e seuil ventilatoire est classiquement défini par :

– la cassure de la courbe VE/ VCO_2 avec une augmentation rapide de la ventilation;

– une augmentation de l'équivalent en CO_2 (VE/VCO_2 en fonction du temps = EqCO_2);
 – une baisse de la pression télé-expiratoire en CO_2 (baisse de la PtCO_2) (fig. 5).

Ce 2^e seuil ventilatoire – appelé aussi seuil de désadaptation ventilatoire dans la mesure où la ventilation n'est plus dépendante de la capnie mais de l'acidose métabolique – nécessite de réaliser un effort maximal; il est surtout utile chez les patients sportif pour calibrer l'intensité de leur entraînement.

6. Autres indices

● Le pouls d'oxygène

Le pouls d'oxygène correspond au ratio de la VO_2 par la fréquence cardiaque. Représentant à chaque instant le produit du VES par la DAVO_2 , il est donc un reflet indirect de l'évolution du volume d'éjection systolique. Lors d'une épreuve d'effort à charge croissante, la différence artérioveineuse augmente, même en présence d'une insuffisance cardiaque évoluée. Par conséquent, une stagnation du pouls d'oxygène observée au cours de l'effort est le reflet d'une baisse du volume d'éjection systolique. La valeur pronostique du pouls d' O_2 reste néanmoins inférieure à celle du pic de VO_2 .

POINTS FORTS

- ➔ Le pic de VO_2 , la pente VE/VCO_2 et la puissance circuloire sont les principaux facteurs pronostiques dans l'insuffisance cardiaque.
- ➔ Le premier seuil ventilatoire est utile, notamment chez le patient insuffisant cardiaque pour juger des activités réalisables sans effort excessif et pour calibrer l'intensité des séances de réadaptation. Le 2^e seuil ventilatoire obtenu en fin d'effort lors d'une épreuve d'effort maximale est utile pour calibrer les séances d'entraînement des sportifs de haut niveau.
- ➔ Il ne faut pas hésiter à réévaluer la capacité d'effort d'un patient insuffisant cardiaque après une optimisation du traitement médical et après un programme de réadaptation afin de juger de la réponse au traitement.

● Temps de récupération de la VO_2

La cinétique de décroissance de la VO_2 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 du fait de l'importance du déficit accumulé, mais aussi du bas débit cardiaque qui ne permet pas en

récupération un apport assez rapide en O_2 aux muscles pour assurer cette resynthèse – ce qui se traduit par un allongement du temps de demi-décroissance de la VO_2 en récupération.

Un sujet sain verra sa VO_2 décroître de plus de 50 % en moins de 80 s, alors qu'un patient insuffisant cardiaque verra son T1/2 VO_2 s'allonger, et ce de manière proportionnelle à son degré d'insuffisance cardiaque (de 100 à 180 s de la classe NYHA I à la classe IV) [14]. La valeur pronostique de ce

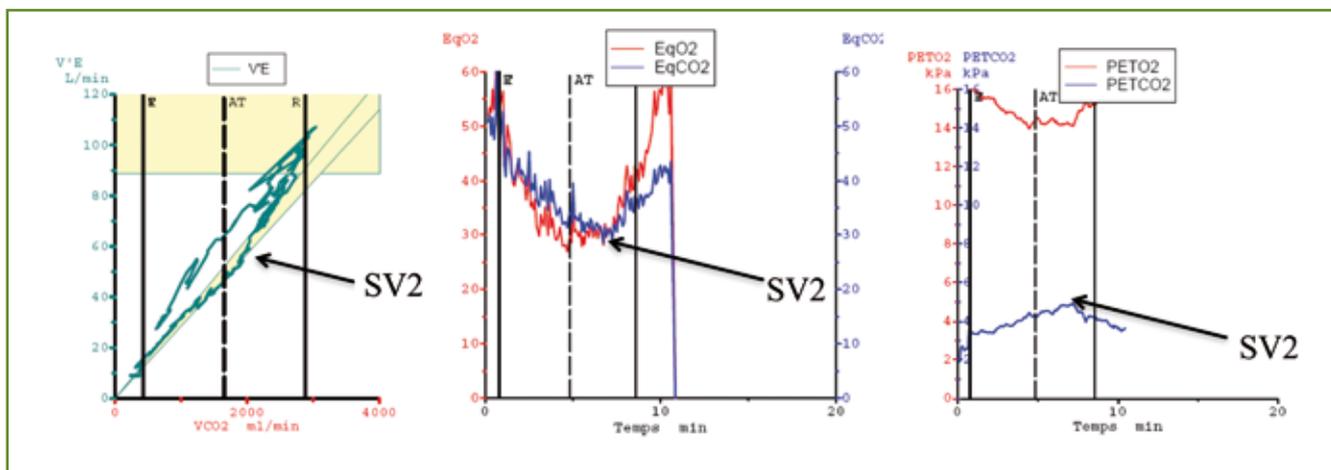


FIG. 5 : Déterminations du SV2.

REVUES GÉNÉRALES

Explorations

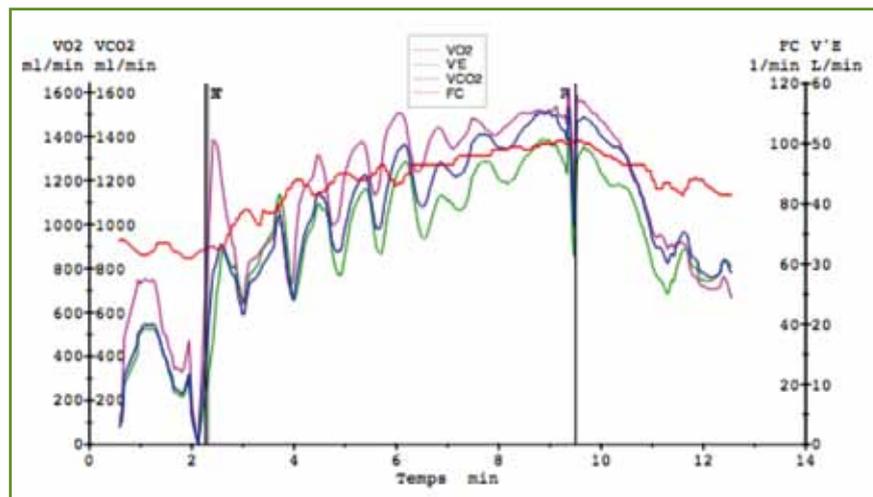


FIG. 6 : Présence d'oscillations respiratoires.

paramètre reste inférieure à celle du pic de VO_2 mais demeure utilisable en présence d'un test d'effort sous maximal. Une prolongation du T1/2 VO_2 , en présence d'un pic de VO_2 abaissé, permet de confirmer que l'on est en présence d'une insuffisance circulatoire sévère et non pas d'une épreuve d'effort sous maximale pour diverses raisons.

● Oscillations respiratoires

La présence d'oscillations respiratoires au repos ou au cours de l'effort témoigne d'un asynchronisme entre la stimulation des chémorécepteurs aortiques à l'hypocapnie et la réponse ventilatoire d'origine centrale, liée notamment à un retard circulatoire (fig. 6). La physiopathologie de ces phénomènes est complexe et se rapproche de celle de la dyspnée de Cheyne-Stokes décrite dans l'insuffisance cardiaque sévère. Ces anomalies témoignent en général d'une insuffisance cardiaque sévère avec élévation des pressions de remplissage; la valeur pronostique indépendante de ces phénomènes reste controversée mais est indiscutablement péjorative [15]. L'existence d'oscillations confirme l'insuffisance circulatoire sévère en présence d'une épreuve brève.

En pratique, quand réaliser le test et quels indices utiliser ?

1. Quand ?

Tout insuffisant cardiaque par dysfonction systolique (car c'est dans ce cadre que la méthodologie a été essentiellement évaluée), apte à réaliser une épreuve d'effort valide, justifie de cet examen, avec une périodicité d'autant plus rapprochée que l'insuffisance cardiaque est sévère.

2. Évaluation fonctionnelle

Le pic de VO_2 est le critère essentiel. Il doit être exprimé en pourcentage des valeurs théoriques, notamment pour les patients jeunes ou très âgés.

Le SV1 et la pente VE/VCO_2 permettent de mieux approcher la tolérance d'un effort sous maximal, c'est-à-dire d'évaluer la gêne fonctionnelle des patients pour réaliser les tâches de la vie courante.

3. Évaluation pronostique

Le pic de VO_2 reste à ce jour le *gold standard*, même si les seuils "critiques" doivent être revus à la baisse chez les patients traités par bêtabloquants

compte tenu d'une amélioration de leur pronostic sous traitement. La prise en compte de l'évolution de la postcharge à travers l'évaluation de la puissance circulatoire ($= VO_2 \times PAS$), ou la prise en compte de la réponse tensionnelle, sensibilise la pertinence de l'information pronostique du pic de VO_2 . Il ne faut pas hésiter à refaire cette évaluation après une optimisation du traitement médical et après un programme de réadaptation et de réentraînement physique afin de juger de la réponse au traitement.

Chez les patients sous bêtabloquants, la pente VE/VCO_2 possède une excellente valeur pronostique probablement supérieure à celle du pic de VO_2 . Enfin, lors d'un test sous maximal, le pic de VO_2 ou la puissance circulatoire ne sont plus utilisables, alors que la pente VE/VCO_2 et d'autres indices tels que le SV1 ou le T1/2 VO_2 en récupération restent valides.

Conclusion

La réalisation d'une épreuve d'effort avec mesure des échanges respiratoires reste l'examen le plus fiable pour évaluer la tolérance à l'effort d'un patient. Celle-ci reste indispensable dans deux populations "opposées" :

- le patient insuffisant cardiaque chez lequel cette évaluation va permettre d'apporter des informations pronostiques majeures et guider la thérapeutique;
- et le sportif de haut niveau chez lequel elle permettra d'apprécier son niveau, guider son entraînement et mesurer les progrès accomplis.

Bibliographie

1. KOIKE A, ITOH H, KATO M *et al.* Prognostic power of ventilatory responses during submaximal exercise in patients with chronic heart disease. *Chest*, 2002;121:1581-1588.
2. LAPU-BULA R, ROBERT A, DE KOCK M *et al.* Relation of exercise capacity to left ventricular systolic function and diastolic filling in idiopathic or ischemic dilated cardiomyopathy. *Am J Cardiol*, 1999; 83:728-734.

