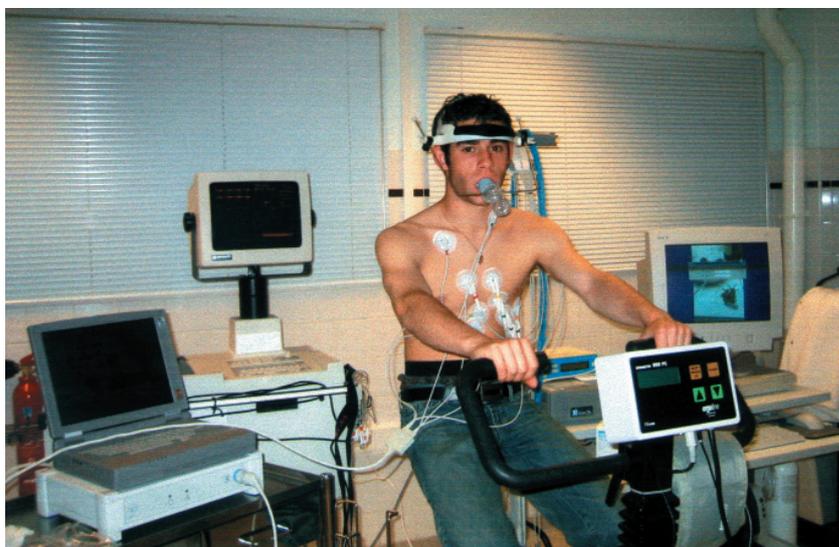




H. HOOREMAN
Rééducation Ambulatoire des Cardiaques,
Hôpital, TAVERNY.

Petit lexique de VO_2 à l'usage des non pratiquants

Le compte rendu d'un examen de mesure de la VO_2 max au cours d'une épreuve cardiorespiratoire (ECR) paraît parfois obscur aux non initiés. Ce lexique, volontairement concis, devrait les aider à mieux tirer parti des informations fournies par l'opérateur. Toutes les valeurs chiffrées mentionnées ici ne peuvent être facilement mémorisées, mais elles ont le mérite d'autoriser des vérifications de la **cohérence** des mesures, entre elles et avec le tableau clinique. Le meilleur "rendement" diagnostique de l'examen est sans doute obtenu lorsque deux praticiens, l'un cardiologue et l'autre pneumologue, lorsque c'est matériellement possible, l'effectuent (et l'interprètent) conjointement.



>>> **Aptitude aérobie** : paramètre fourni par la mesure de la VO_2 max. On parle de limitation modérée de l'aptitude aérobie pour une $VO_2 < 85\%$ de la VO_2 max théorique attendue, sévère pour des valeurs $< 60\%$.

>>> **Asthme d'effort** : il se manifeste par une limitation des débits bronchiques qui apparaît à la fin de l'effort et qui régresse sous bêta-2 mimétiques.

>>> **Borg (échelle de Borg)** : échelle ouverte destinée à l'évaluation de la dyspnée par le patient lui-même (0 = pas de dyspnée, 0,5 = dyspnée à peine notable, etc., jusqu'à 10) lors d'une ECR.

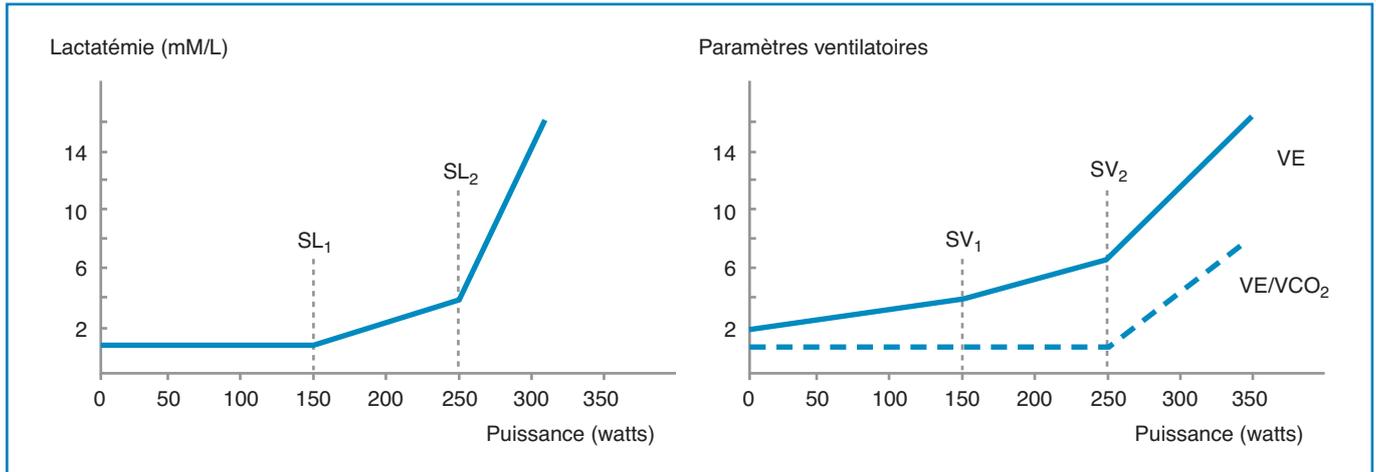
>>> **BPCO (bronchopneumopathie obstructive)** : se manifeste à l'effort par une amputation de la réserve ventilatoire (voir ce terme), une fréquence cardiaque très sous-maximale, une augmentation de la fréquence respiratoire. A l'effort, le

temps expiratoire devient progressivement de plus en plus court, à l'origine d'une "hyperinflation dynamique" : la distension s'aggrave au fur et à mesure de l'effort.

>>> **Calibration** : phase initiale, capitale, de la mesure de la VO_2 max d'un patient où l'on procède à l'étalonnage de l'appareil en ce qui concerne les volumes et les analyseurs gazeux. Elle doit être réalisée avant chaque examen.

>>> **Débit cardiaque (Q_c)** : c'est le produit du volume d'éjection systolique par la fréquence cardiaque ($VES \times FC$). Il augmente à l'effort de façon quasi linéaire avec la puissance de travail et la VO_2 avec laquelle il est lié par la relation suivante : $Q_c = 5,5 VO_2 + 4,5$ L/mn. Il peut atteindre plus de 25 L/mn à l'effort.

>>> **Equivalent respiratoires (ERO_2 et $ERCO_2$)** : ce sont les rapports VE/VO_2 et VE/VCO_2 , qui représentent respecti-



vement le nombre de litres d'air qu'il faut ventiler pour consommer 1 litre d'O₂ et pour rejeter 1 litre de CO₂. Ils reflètent le rendement de l'appareil respiratoire. Les chiffres s'élèvent anormalement chez les patients atteints de BPCO et dans le syndrome d'hyperventilation.

>>> **Fibrose pulmonaire**: au cours d'une ECR, la fibrose pulmonaire se traduit par l'association d'une baisse (mais non d'une abolition) de la réserve ventilatoire, d'une ventilation très rapide et superficielle à petit volume courant et grande fréquence respiratoire (parfois > 45/mn) et d'une hypoxie induite par l'effort et parfois très marquée.

>>> **Gaz du sang**: leur mesure constitue l'examen de référence pour évaluer la qualité des échanges gazeux, l'efficacité de la ventilation alvéolaire et les perturbations de l'équilibre acido-basique. La nécessité de réaliser une ponction artérielle radiale rend difficile la répétition des mesures; on a alors souvent recours à la mesure transcutanée de la saturation en O₂ de l'hémoglobine par un oxymètre de pouls (voir ce terme) ou, dans certains laboratoires, à un prélèvement artérialisé au lobe de l'oreille.

>>> **Hyperventilation inappropriée**: elle définit une hyperventilation excessive par rapport au niveau métabolique atteint, c'est-à-dire par rapport à la VCO₂. Elle implique le plus souvent une hypocapnie et toujours une tachypnée mal tolérée. C'est un syndrome fréquemment retrouvé chez des patients dyspnéiques à l'effort et pourtant ni "cardiaques", ni "respiratoires".

>>> **Incompétence chronotrope**: elle est définie par une FC max < 65 % de la FC max alors que l'ECR est pourtant métaboliquement maximale (voir ce terme), notamment au niveau

du quotient respiratoire. C'est une excellente méthode pour porter l'indication d'une stimulation cardiaque permanente sur le mode AAIR. A noter que la FC max constatée est d'autant plus basse que le niveau de sédentarité est élevé. Cela n'est bien entendu valable que chez des patients ne recevant pas de médicaments bradycardisants, y compris les bêtabloquants en collyre...

>>> **Interprétable (l'ECR est-elle techniquement interprétable?)**: un contrôle a posteriori de la qualité des mesures et de leur cohérence est possible, à l'aide de la pente VO₂/watts, normalement proche de 10 mL d'O₂/mn/watts. Une valeur abaissée suggère une diminution de l'utilisation de l'oxygène due à une insuffisance cardiaque, un déconditionnement... ou un problème technique. Une valeur augmentée peut s'observer en cas d'obésité importante. Un bon laboratoire d'ECR devrait régulièrement soumettre un ou plusieurs sujets "étalons" à un test de routine comparatif.

>>> **Lactates**: la production de lactates au cours de l'effort suit une courbe avec 2 "cassures", vers 2 et 4 mm/L, qui coïncident avec les seuils ventilatoires 1 et 2. Leur mesure est peu utilisée en pathologie, davantage en médecine du sport.

>>> **Mac Ardle (maladie de Mac Ardle)**: cytopathie mitochondriale avec absence d'élévation des lactates à l'effort par déficit en G6PD.

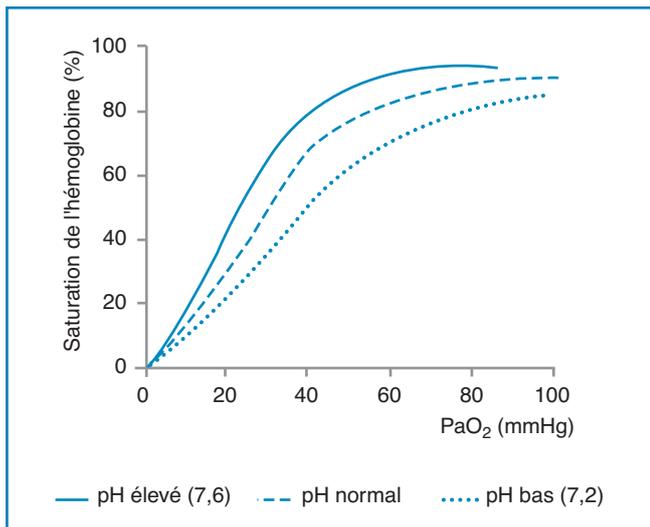
>>> **Maximalité (critères de maximalité d'une ECR)**: une ECR est dite maximale si un ou plusieurs critères suivants sont obtenus:

- plateau de VO₂ en fin d'effort: la VO₂ n'augmente plus malgré la poursuite de l'effort,
- quotient respiratoire (QR) > 1,1,

- taux de lactates > 8 mmol/L en fin d'effort (si on les mesure),
- fréquence cardiaque > 220 – l'âge ± 10 bat/mn.
- impossibilité de maintenir une vitesse de pédalage égale à 50 à 60 tours/mn sur vélo,
- pH < 7,30 (si on le mesure).

►►► **MET (Metabolic Equivalent of the Task)** : l'unité métabolique (1 MET = 3,5 ml/kg/mn) correspond à la consommation d'O₂ au repos pour assurer les grandes fonctions de l'organisme. La VO₂ de repos d'un patient de 70 kg est donc proche de 245 mL. En retranchant cette valeur de la VO₂ max constatée, on en déduit facilement la pente VO₂/watts (voir ce terme).

►►► **Oxymètre de pouls** : appareil destiné à la mesure de la saturation en O₂ de l'hémoglobine ; son utilisation, très répandue, est irremplaçable pour éviter la mesure répétée des gaz du sang artériel, même si elle est moins performante. La fiabilité de la mesure est excellente lorsque la saturation est > 90 %, mais nettement moins bonne pour une saturation < 80 %. L'hypothermie, l'hypotension, une arythmie altèrent la fiabilité des mesures, de même que la peau noire. La mesure de la saturation est utile pour différencier les "cardiaques" (qui ne désaturent pas) et les "respiratoires" (qui désaturent).



►►► **Pente VO₂/watts** : son étude fait partie des critères de "qualité" de l'ECR (voir le terme "Interprétable").

►►► **Pouls d'oxygène** : c'est le rapport VO₂/FC, il représente donc la quantité d'O₂ consommée à chaque systole, sachant que VO₂ = volume d'éjection systolique (VES) x FC x différence artérioveineuse en O₂. Le pouls d'Oxygène VO₂/FC est donc un reflet du VES et donc de la fonction "pompe" du cœur. Plus que sa valeur absolue, c'est la cinétique du pouls d'O₂ qu'il faut

regarder. A l'effort, le pouls d'O₂ croît progressivement jusqu'à un plateau. Il est < 10 mL/bat dans l'insuffisance cardiaque.

►►► **Quotient respiratoire** : c'est le rapport VCO₂/VO₂, il est voisin de 1 lors de l'apparition du seuil ventilatoire et doit être > 1,10 pour que l'ECR soit considérée comme maximale. La courbe VCO₂/VO₂ définit la courbe de Beaver, qui est l'un des moyens d'identification du seuil ventilatoire (voir schéma).

►►► **Réentraînement à l'effort (REE)** : il consiste à prescrire l'exercice physique essentiellement en endurance (marche, vélo, rameur...) en ciblant une FC proche de la FC identifiée lors du seuil ventilatoire, en pratique vers 40 à 50 % de la VO₂ max constatée chez l'insuffisant cardiaque, et vers 70 ou 80 % de la VO₂ max chez l'insuffisant coronarien. La même technique s'applique au cours du REE des patients atteints de BPCO, lesquels n'ont pas toujours de seuil ventilatoire identifié ; on se place alors aux environs des 2/3 de la charge maximale supportée lors du test d'effort d'évaluation initiale, parfois en proposant des créneaux alternant charge quasi maximale et charge sous-maximale.

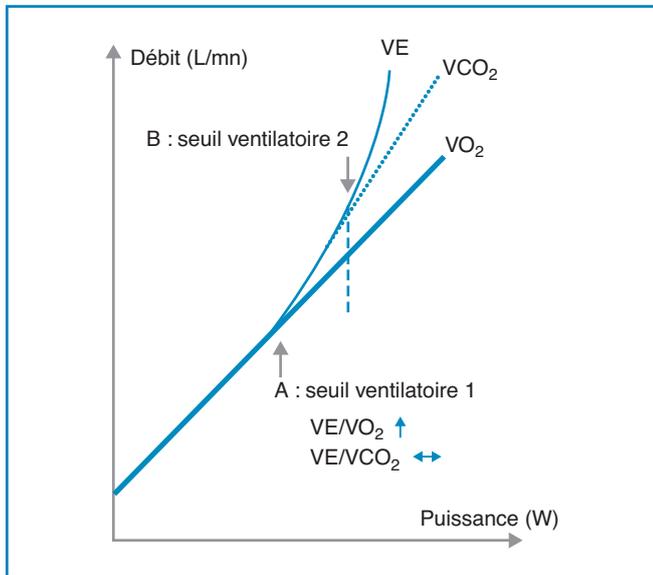
►►► **Réserve chronotrope (RC)** : différence entre la FC max atteinte et la FC max théorique. Elle est élevée dans la BPCO.

►►► **Réserve ventilatoire (voir aussi VE)** : différence entre la VE max constatée et la ventilation volontaire maximale (VMM) théorique par minute, que l'on admet voisine de VEMS x 35. La réserve ventilatoire est en principe voisine de 30 % de la VMM. L'abolition de la réserve ventilatoire signe en général une dyspnée d'effort d'origine respiratoire et non cardiologique ("toute la réserve ventilatoire est utilisée"), mais l'athlète de très haut niveau, ou au contraire l'obèse, peuvent également voir leur réserve ventilatoire diminuée à l'effort. Une courbe débit-volume, permettant de mesurer le VEMS, est donc nécessairement pratiquée avant chaque ECR pour évaluer la VMM et donc la réserve ventilatoire.

►►► **Seuil(s) ventilatoire(s)** : le "seuil ventilatoire" (encore appelé SV1 ou seuil d'adaptation ventilatoire) est défini comme un changement de régime ventilatoire, survenant vers 60 % de la VO₂ max, avec une augmentation de la VE qui n'est plus proportionnelle à l'augmentation de la VO₂, la dépasse et suit alors la progression de la VCO₂. Il est contemporain de ce que l'on appelle communément le "2^e souffle". Ce SV1 n'est pas toujours atteint chez le patient "respiratoire" contrairement au patient "cardiaque" chez qui il est en principe facilement identifié. Il se rapproche de la VO₂ max (75,

► Epreuve cardiorespiratoire

voire 80 % de celle-ci) avec l'entraînement en endurance, et survient au contraire plus tôt avec la sédentarité. On devrait logiquement (et physiologiquement) situer le SV1 par rapport à la VO_2 max *observée*, chez le sujet sain, à la VO_2 max *théorique*, chez le sujet pathologique. Chez le sujet normal, et en particulier chez l'athlète, on identifie parfois un 2^e seuil (SV2 ou seuil d'inadaptation ventilatoire), où la VE croît encore plus vite que la VCO_2 , signalant que l'effort va très prochainement s'arrêter. Ce 2^e seuil est attribué à une stimulation des



centres nerveux respiratoires (voir schéma).

>>> **Symptom limited** : se dit d'une ECR qui n'a pas pu être maximale d'après les différents critères utilisés (plateau de VO_2 ; quotient respiratoire > 1,10; FC max théorique non atteinte), quelle que soit la cause de l'arrêt prématuré de l'effort : déconditionnement, trouble rythmique, cause respiratoire... On parle alors d'une VO_2 "pic".

>>> **Test de marche de 6 mn (TM6)** : test d'effort précédant parfois l'ECR et consistant à faire effectuer au patient la distance maximale possible, sans courir, en 6 mn, en général avec une surveillance par un oxymètre de pouls de la saturation de l'hémoglobine. Il s'effectue habituellement dans un couloir balisé d'au moins 30 mètres, avec des allers et retours, sans obstacles. Un adulte "normal" de 65 ans effectue 630

Homme	$(7,57 \times T) - (5,02 \times A) - (1,76 \times P) - 309$ mètres
Femme	$(2,11 \times T) - (2,29 \times P) - (5,78 \times A) + 667$ mètres

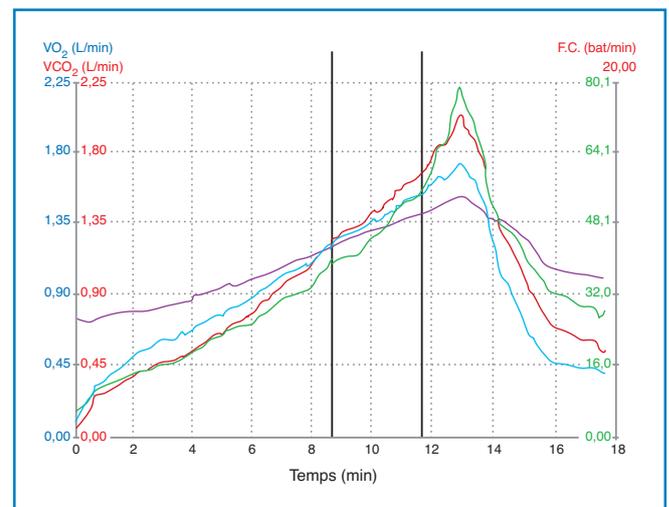
mètres environ.

Plusieurs études ont mis en évidence une relation linéaire entre la distance parcourue lors du TM6 et le pic de VO_2 chez

des insuffisants cardiaques sévères en attente de transplantation : VO_2 pic = $0,03 \times$ distance au TM6 + 3,98 (Cahalin). Une relation nette n'a pas été retrouvée au cours de l'insuffisance respiratoire chronique. De grandes études, notamment dans l'insuffisance cardiaque et son traitement par resynchronisation biventriculaire, ont inclus dans leurs critères d'évaluation le TM6, plus facile à réaliser que la VO_2 proprement dite, particulièrement chez les patients âgés.

>>> **VE (ventilation)** : débit ventilatoire constaté et mesuré chez le patient ; c'est le résultat du produit du VT (volume courant) par la FR (fréquence respiratoire). La VE augmente à l'effort, essentiellement par augmentation du VT en début d'effort et de la FR en fin d'effort. La VE max est toujours inférieure à la ventilation maximale minute (VMM, estimée proche de $VEMS \times 35$) qui est la ventilation maximale qu'un sujet peut effectuer volontairement au repos. Ce point fondamental débouche sur la notion de réserve ventilatoire (voir ce terme). La VE croît linéairement à l'effort, comme la VO_2 , selon la relation $VE = 22 VO_2 + 5$ et $VE = 24,6 VCO_2 + 3,2$ et cela jusqu'au seuil ventilatoire, où la VE va alors suivre la VCO_2 . La VE est anormalement élevée dans le syndrome d'hyperventilation.

>>> **VO_2 et VCO_2** : consommation d'oxygène et de rejet de gaz carbonique constatés lors d'une ECR. La VO_2 est classiquement le produit du débit cardiaque Q_c par la différence artérioveineuse en O_2 . Il s'agit d'un débit, exprimé en L/mn, (on devrait donc logiquement parler du VO_2 max...), très souvent indexé au poids (mL/kg/mn). Les courbes de VO_2 et de VCO_2 sont parallèles jusqu'au niveau du seuil ventilatoire, puis divergent avec une croissance plus rapide de la VCO_2 . La VO_2 plafonne au maximum de l'effort, ce qui est la définition même de la VO_2 max. Ce plateau n'est pas toujours atteint, on



► Epreuve cardiorespiratoire

parle de VO_2 pic ou VO_2 SL pour “symptom limited”.

Il n’y a aucune relation entre la VO_2 max et la fraction d’éjection : deux patients avec la même FE peuvent avoir deux capacités d’effort (et donc deux VO_2 max) très différentes. A partir de la VO_2 de repos, la VO_2 max s’obtient en multipliant par un facteur égal à 12, selon les modalités suivantes (H. Perrault) :

FC de repos : x par 2,4

VES : x par 1,6

DAV : x 3

Les valeurs normales de VO_2 figurent sur le tableau ci-des-

Sujet	Ergomètre	Poids	Valeurs normales de VO_2 (mL·min ⁻¹)
Homme	Vélo	Normal	$P \times (50,72 - 0,372 \times A)$
		Obèse	$(0,79 \times T - 60,7) \times (50,72 - 0,372 \times A)$
	Tapis roulant	Normal	$P \times (56,36 - 0,413 \times A)$
		Obèse	$(0,79 \times T - 60,7) \times (56,36 - 0,413 \times A)$
Femme	Vélo	Normal	$(42,8 \times P) \times (22,78 - 0,17 \times A)$
		Obèse	$T \times (14,81 - 0,11 \times A)$
	Tapis roulant	Normal	$P \times (44,37 - 0,413 \times A)$
		Obèse	$(0,79 \times T - 68,2) \times (44,37 - 0,413 \times A)$

A : âge en années, P : poids en kg, T : taille en cm.

sous (Wassermann) :

>>> **WEBER** : (classification de Weber) : elle définit les

I	SV > 14 mL	VO_2 max > 20 mL/kg/mn
II	SV 11 à 14 mL	VO_2 max 16 à 20 mL/kg/mn
III	SV 8 à 10 mL	VO_2 max 10 à 15 mL/kg/mn
IV	SV < 8 mL	VO_2 max < 10 mL/kg/mn

4 stades de l’insuffisance cardiaque selon le seuil et la VO_2 pic : Avec le REE, il est possible de faire gagner une classe de Weber à un patient, et parfois même de le retirer d’une liste d’attente d’une greffe.

■ APPLICATION PRATIQUE : POURQUOI MON PATIENT EST-IL ESSOUFFLE ?

A l’issue du recueil des différentes données évoquées ci-des-

sus, il sera le plus souvent possible d’identifier la situation clinique du patient dyspnéique à l’effort dans l’un des 4 cas de

	Dyspnée respiratoire	Dyspnée cardiaque	Dyspnée périphérique	Hyperventilation inappropriée
VO_2	↘↘	↘↘	↘	N
RV	↘↘	N	N	N
FR	↗↗	↗	N-↗	↗↗↗
RC	↗↗	↗	N	N
Pouls O_2	N	↘	↘	N
SV	N ou O	N	↘↘	N

RV : réserve ventilatoire ; RC : réserve chronotrope ; SV : seuil ventilatoire.

figure du tableau suivant :

■ CONCLUSION

L’épreuve d’effort cardiorespiratoire voit sa place réelle dans la démarche diagnostique vis-à-vis du patient “essoufflé”. Elle est de plus en plus incontournable, parallèlement aux autres méthodes (écho-Doppler, BNP, fraction d’éjection isotopique, débit cardiaque non invasif…), tout au moins chez les patients “valides”, c’est-à-dire capables d’un minimum d’effort physique (handicap locomoteur, etc.), motivés (acceptant donc de persévérer tout de même assez loin dans leur dyspnée d’effort), et coopérants (s’abstenir du test chez le patient sujet aux attaques de panique, ayant “peur de s’étouffer” ou ayant des difficultés d’élocution et de compréhension…

L’épreuve d’effort cardiorespiratoire doit trouver toute sa place dans un laboratoire d’explorations cardiovasculaires, parallèlement au test d’effort classique qui garde ses propres indications (dépistage de tous les jours, profil tensionnel d’effort, évaluation des rétrécissements aortiques, etc.) ou couplé aux diverses imageries disponibles par scintigraphie ou échographie.