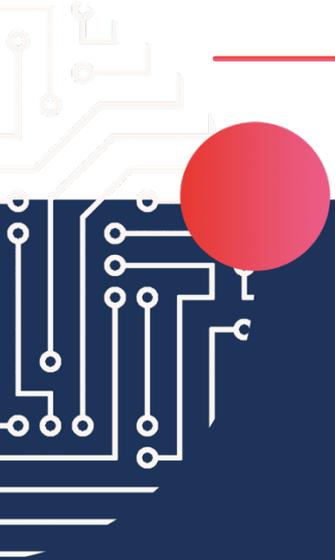


Outil

Test d'effort avec mesure des échanges gazeux respiratoires (VO₂)

Ce protocole a été rédigé par un groupe d'experts. Il est partagé à titre informatif et ne peut se substituer aux validations locales propres aux autres établissements.



Auteurs

Luca Mascaro, CH de Saint-Quentin

Relu par

Patrick Meimoun, CH de Compiègne
Shamir Vally, CHU de La Réunion

Sommaire

Objectif :	2
<i>I. Bases physiologiques de la VO₂ à l'effort</i>	2
<i>II. Réalisation pratique du test d'effort avec mesure de la VO₂</i>	3
• Indication du test d'effort	4
• Absence de contre-indication	4
• Valeurs mesurées :	5
• Critères d'un test maximal :	5
<i>III. Interprétation du test VO₂ : paramètres clés et implications cliniques</i>	6
1. VO ₂ max ou pic de VO ₂	6
2. Pente VE/VCO ₂	6
3. Puissance circulatoire	6
4. Oscillations respiratoires	7
5. OUES (Oxygen Uptake Efficiency Slope)	7
6. Pouls d'oxygène	8
7. Temps de récupération de VO ₂	8
8. Autres paramètres clés à surveiller	8
VO ₂ max chez le sportif	9
<i>Conclusion</i>	10
Annexe : Exemple de compte rendu type du test d'effort VO ₂	11
Sources	12
Mots-clés	12

Objectif :

L'objectif principal est d'expliquer les fondements physiologiques du test d'effort avec mesure des échanges gazeux respiratoires, mesure de la VO₂, détailler sa réalisation pratique et préciser ses indications.

I. Bases physiologiques de la VO₂ à l'effort

Le **VO₂ max** correspond à la consommation maximale d'oxygène par l'organisme au cours d'un effort. Elle nécessite un plateau dans la consommation d'oxygène malgré une augmentation de l'intensité de l'exercice, le test étant maximal. Elle est très rarement atteinte en pratique et on se contente de mesurer le pic de VO₂ obtenu à l'effort qui est la valeur de VO₂ la plus élevée atteinte au cours du test d'effort en l'absence de plateau.

Il s'agit du volume d'oxygène prélevé par le système ventilatoire, transporté par le sang, et utilisé par l'organisme par unité de temps (L/min ; ou mL/min/Kg). Cela correspond au reflet du processus énergétique aérobie, l'oxydation cellulaire.

Il existe 3 types de métabolisme selon la durée de l'effort :

- **Anaérobic, alactique** : Exercice très court, quelques secondes
- **Anaérobic, lactique** : Exercice bref, moins de 2 minutes
- **Aérobic** : Exercice long

Cette valeur du pic de VO₂ résulte de l'interaction de plusieurs fonctions : cardio-circulatoire, pulmonaire et musculaire périphérique.

Elle nous est donnée par l'équation de Fick : $VO_2 = Q_c \times (Ca_{O_2} - Cv_{O_2})$.

Il reflète l'intégration de plusieurs paramètres (cf. Figure 1) :

- **Débit cardiaque (Q_c)** : fréquence cardiaque (FC) × volume d'éjection systolique (VES)
- **Extraction périphérique d'O₂** : différence artério-veineuse (Ca O₂ - CvO₂).
- **Ventilation et diffusion pulmonaire.**

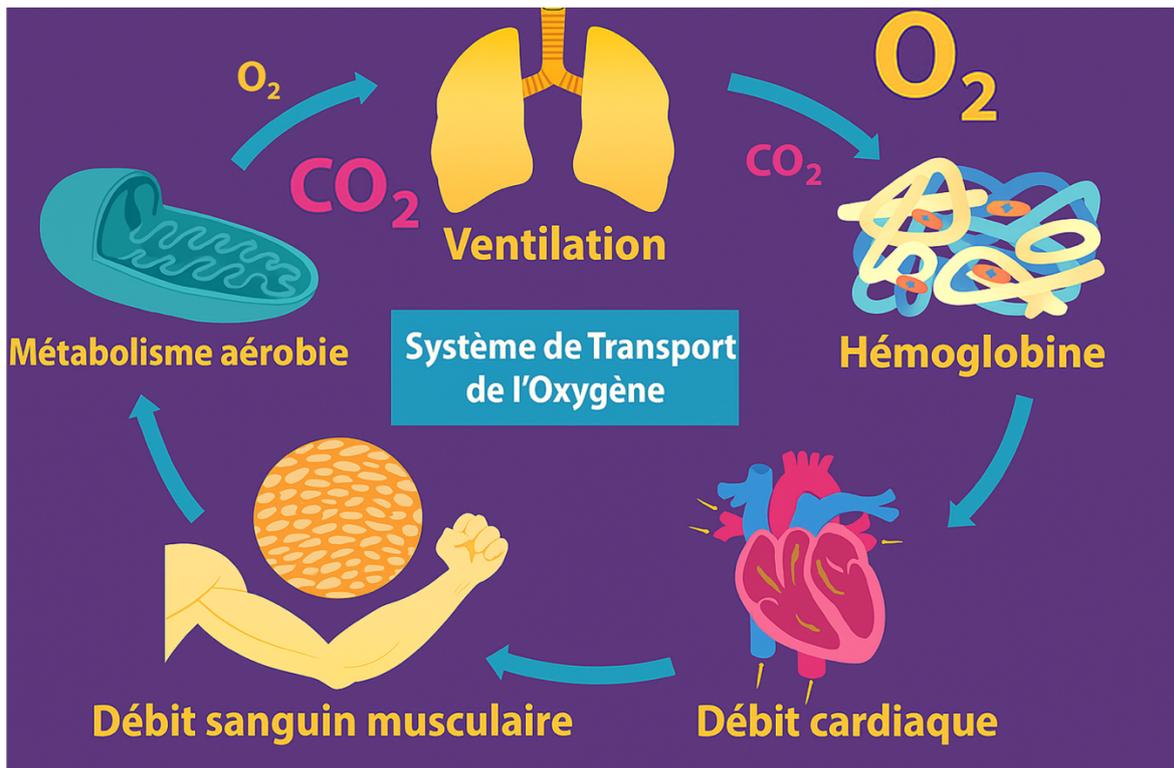


Figure 1 : Différents paramètres du VO2 max

En fonction des résultats obtenus par l'intermédiaire de ce test d'effort, il est possible de s'orienter en cas d'anomalie vers l'atteinte préférentielle de tel ou tel appareil (cardio-circulatoire, respiratoire, métabolique, déconditionnement...) ou atteinte mixte.

II. Réalisation pratique du test d'effort avec mesure de la VO2

Ce test s'effectue en présence d'un personnel médical avec des moyens de réanimation d'urgence à disposition (Défibrillateur, Kit de perfusion, médicaments d'urgence, oxygène...).

Il se déroule dans l'immense majorité des cas soit sur tapis soit sur ergocycle avec un analyseur des gaz expirés.

Cet analyseur doit être calibré et étalonné de façon régulière.

Un électrocardiogramme d'effort est bien sûr enregistré tout au long du test, tout comme la mesure de la pression artérielle.

Une spirométrie de base sera effectuée avant le test.

Il est important de bien choisir l'ergocycle sur lequel sera effectué le test d'effort, en tenant compte des capacités et de la pratique du patient afin d'effectuer ce test dans les meilleures conditions possibles.

Le test d'effort peut parfois être associé à une échocardiographie pour obtenir des paramètres supplémentaires (FEVG, cinétique, valves, PAPS, fonction diastolique).



Figure 2 : Illustration d'un test d'effort VO2 max sur tapis.

Il faut que savoir que le test d'effort sur tapis donnera des valeurs de VO2 légèrement supérieures par rapport au cycloergomètre, hors cycliste de métier.

Avant de débiter le test d'effort, il existe des prérequis auxquels nous devons répondre :

- **Indication du test d'effort**

- Exploration d'un symptôme : douleur thoracique, dyspnée, palpitations.
- Suivi de cardiopathie : Ischémie, hypertrophique, valvulaire, rythmique...
- Bilan dans la cadre d'une insuffisance cardiaque : La VO2 étant l'un des marqueurs pronostic le plus puissant (Seuil à 14 ml/min/kg ou 12 ml/min/kg en cas de bêtabloquant) ; avec l'enjeu d'adaptation thérapeutiques.
- Sportif : Détection des zones d'entraînement, exploration de symptômes inhabituels.

- **Absence de contre-indication**

Tout patient instable :

- Infarctus du myocarde récent (< 1 semaine)
- HTA sévère (PAS > 200 mmHg)
- Arythmie cardiaque non contrôlée
- Insuffisance cardiaque aigüe
- Dissection aortique
- Rétrécissement aortique serré symptomatique
- Asthme décompensé, insuffisance respiratoire aigüe

NB : une hypertension pulmonaire modérée à sévère et une insuffisance rénale chronique sévère (stades IV et V) sont des contre-indications relatives.

- **Valeurs mesurées :**

- FC, PA, SpO₂
- Ventilation minute (VE)
- Fraction expirée en O₂ et CO₂
- Pression télé-expiratoire en O₂ et CO₂ (PetO₂ et PetCO₂)
- Toutes les autres valeurs sont calculées

- **Critères d'un test maximal :**

- QR > 1,1 (effort maximal)
- Plateau de VO₂ (< 150 mL O₂/palier)
- Fréquence cardiaque maximale (FCmax) théorique atteinte (> 85 %)
- Épuisement du sujet ou impossibilité de maintenir l'allure (RPM < 40)
- Réserve ventilatoire < 30% (+/- 10)
- Rapports VE/VO₂ et VE/VCO₂ augmentés
- Acidose métabolique (pH < 7.3)

Concernant le choix du protocole, il doit être adapté au patient. Il peut s'agir d'incrément en rampe ou d'incrément par palier.

On ne fera pas le même protocole à un insuffisant cardiaque qu'à un sportif.

Le protocole doit être créé de tel sorte à ce que le patient atteigne son pic de VO₂ en 10 minutes environ.

On respectera une période d'échauffement réglementaire de 3 minutes et une période de récupération de 6 minutes afin de dépister d'éventuels effets secondaires, arythmie, ...

Quelques exemples pratiques de protocoles :

- Un **sportif de haut niveau** (≥ 6 mois, à raison de 6 h/semaine à ≥ 60% de la VO₂ max) :

→ Sur ergocycle : échauffement à 70W et incrément en rampe de 30W/min

→ Sur tapis : début à 8km/h et incrément de 1km/h/minute

- Un **insuffisant cardiaque** :

→ Sur ergocycle : échauffement à 20W/min et incrément en rampe de 10W/min

→ Sur tapis : privilégier les incréments en pente plutôt qu'en vitesse

III. Interprétation du test VO2 : paramètres clés et implications cliniques

L'interprétation du test VO2 repose sur l'analyse combinée de plusieurs paramètres, qui orientent le pronostic, la stratégie thérapeutique, et la recherche étiologique des symptômes.

1. VO2 max ou pic de VO2

Le pic de VO2 (VO2 max si plateau atteint) est le marqueur principal de la capacité aérobie.

Valeurs pronostiques en cas d'insuffisance cardiaque (IC):

Classe NYHA	VO2 max moyen (mL/kg/min)	Interprétation clinique
II	18–25	Bon à moyen
III	12–17	Surveillance rapprochée
IV	< 12	Mauvais pronostic → discussion assistance/transplantation

💡 Un VO2 max < 14 mL/kg/min (ou < 12 si sous bêtabloquant) est un critère **majeur** dans la décision de transplantation cardiaque.

2. Pente VE/VCO₂

- Reflète l'efficacité de la ventilation à éliminer le CO₂.
- Très sensible à l'hyperventilation inefficace, souvent retrouvée en IC.
- Associée à l'hypertension pulmonaire.

Seuil critique :

- VE/VCO₂ > 34 → associé à une mortalité plus élevée dans l'IC.
- Utilité : **stratification pronostique** ; utilisable si test sous-maximal ; aide à ajuster les traitements (diurétiques, ventilation).

3. Puissance circulatoire

Formule : **PAS maximale** × VO2 pic

- Représente la capacité du système circulatoire à soutenir l'effort.
- Seuil critique : < 2000 → **mauvais pronostic en IC**.
- Norme > 3500.

Exemple chez un patient insuffisant cardiaque :

- PAS maximale de 170 mmHg
- VO₂ pic 16 mL/Kg/min
- Puissance circulatoire = 170 x 16 = 2720
- Interprétation : paramètre altéré (reflet de la pathologie) mais non critique.

4. Oscillations respiratoires

- Présence d'un **rythme respiratoire irrégulier** à l'effort, visible sur la courbe VE.
- Signifie un **mauvais couplage cardiorespiratoire**, souvent dans l'IC avancée.
- Associées à une surmortalité.

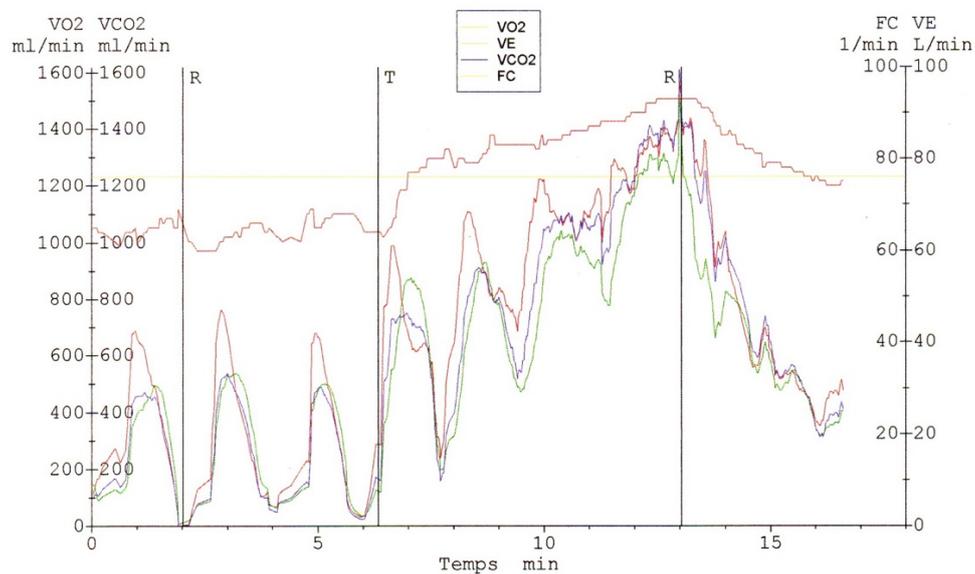


Figure 3 : Exemple d'oscillations respiratoires.

5. OUES (Oxygen Uptake Efficiency Slope)

- Mesure non linéaire de l'efficacité ventilatoire à l'effort.
- Calculée à partir de la pente de la relation VO₂ / log(VE).

Valeur seuil :

- OUES < 1.47 = mauvais pronostic (valable même si effort sous-maximal).

6. Pouls d'oxygène

- Formule : $\text{Pouls d'O}_2 = \text{VO}_2 / \text{FC}$, avec $\text{VO}_2 = \text{Qc} \times \text{DavO}_2$, et $\text{Qc} = \text{VES} \times \text{FC}$
 $\text{Pouls d'O}_2 = (\text{VES} \times \text{FC} \times \text{DaVO}_2) / \text{FC}$
 $\text{Pouls d'O}_2 = \text{VES} \times \text{DavO}_2$
- Représente indirectement le **volume d'éjection systolique (VES)** lorsque la différence artérioveineuse en O₂ est stable.

Analyse dynamique :

- **Croissance régulière attendue** jusqu'au pic.
- **Plateau ou chute** en fin d'effort → suspecter une **chute du VES** :
 - Cardiopathie ischémique
 - Valvulopathies

7. Temps de récupération de VO₂

- Reflète l'efficacité du système cardiovasculaire et mitochondrial (resynthèse des réserves énergétiques).
- Norme : diminution de 50% de la VO₂ < 80 secondes
- Mauvais pronostic si :
 - ΔVO_2 à 1 min < 10 mL/Kg/min
 - T ½ VO₂ > 100 voire 180 sec
- Utilisable en cas de test sous-maximal.

8. Autres paramètres clés à surveiller

Paramètre	Seuil critique	Signification / Action clinique
Quotient respiratoire (QR)	> 1.1	Effort maximal atteint
Plateau de VO ₂	Incrément < 150 mL O ₂	Signe de plateau : effort maximal
Fréquence cardiaque max théorique	> 85 %	Si atteinte = effort valide / sinon → insuffisance chronotrope
Réserve ventilatoire	< 30 %	Limitation ventilatoire (attention à l'hyperventilation)
Acidose métabolique	pH < 7.30	Signature biologique d'un effort intense / ou tolérance altérée
Chute du pouls d'O ₂	Après SV1	VES probable → coronaropathie ou valvulopathie

A noter, que l'insuffisance chronotrope (non-augmentation de la fréquence cardiaque à l'effort sans bêtabloquant) et l'absence d'élévation tensionnelle à l'effort sont 2 marqueurs péjoratifs et peuvent orienter vers une cardiopathie.

• VO2 max chez le sportif

Il existe une forte corrélation avec la performance en endurance.

Ce test va permettre de déterminer des seuils d'entraînement qui guideront le sportif dans son entraînement.

Plus que des seuils, il s'agit plutôt de zone de transition.

Le **1^{er} seuil ventilatoire** (ou seuil aérobie) correspond à l'incapacité de l'organisme à produire l'énergie nécessaire à la réalisation de l'effort par le seul métabolisme aérobie: donc production de lactates. Il se traduit cliniquement par une hyperventilation.

Il se situe généralement à une valeur de 40-60% du pic de VO2 chez le sujet sédentaire, et 70-85% du pic de VO2 chez le sportif, une dyspnée selon l'échelle de Borg entre 6-9 et à 60-70% de la FCmax (FC très variable).

Il peut être déterminé de plusieurs façons :

- Augmentation de la pente VE/VO2 sans augmentation de la pente VE/VCO2 (Figure 2)
- Méthode de Wasserman (ou V-slope): cassure de la courbe VCO2/VO2: augmentation plus rapide de la VCO2 (= production de CO2) par production de lactates
- Augmentation de la PetO2 (pression télé-expiratoire en O2) sans modification de la PetCO2

Il est intéressant lors de la **pratique de la course à pied** avec objectif de marathon de travailler ce SV1, qui correspond à l'allure du marathon. Plus la courbe de SV1 se décalera vers la droite plus le sportif sera endurant.

Le **2^{ème} seuil ventilatoire** (ou seuil anaérobie) est surtout utilisé chez le **sportif** pour calibrer l'intensité de l'entraînement.

Il correspond au moment où il existe une augmentation de VE/VCO2 sans variation de VE/VO2 (Figure 2). C'est le moment proche de l'épuisement.

Il se situe généralement pour une VO2 > 85% du pic de VO2 chez le sportif et est très rarement rencontré chez le non sportif, avec une dyspnée selon l'échelle de Borg >14 et > 90% de la FCmax.

Il s'agit de l'allure du 10 000 mètres. Ce seuil est très utile pour la réalisation de **séances dites fractionnées**.

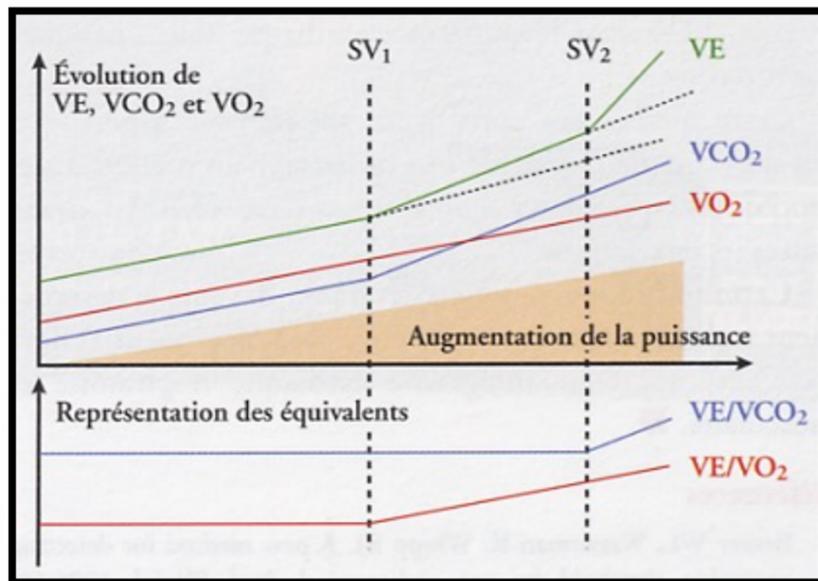


Figure 2 : Seuils ventilatoires selon les rapports VE/VO₂ et VE/VCO₂.

Conclusion

Le VO₂ max est un examen intéressant qui évalue à la fois la fonction respiratoire, cardio-circulatoire et métabolique au cours du même examen.

C'est un élément important de la prise en charge de l'insuffisance cardiaque, utile dans l'exploration d'une dyspnée inexpliquée, dans le cadre des valvulopathies asymptomatiques, avec un impact thérapeutique et pronostique direct, et chez le sportif pour guider son entraînement et explorer ses symptômes éventuels.

Il est également utile dans le suivi de cardiopathie mais également à visée diagnostique en présence de symptômes cardiovasculaires. Il est plus complet qu'un test d'effort seul.

Un élément majeur est la constitution du protocole qui doit être adaptée au patient.

Annexe : Exemple de compte rendu type du test d'effort VO2

- Test d'effort sur ergocycle/tapis, mené à ... W (...% théorique), arrêt pour épuisement musculaire/dyspnée/douleur.
- Sur le plan cardiaque :
 - ECG de repos...
 - PA de repos... mmHg
 - A l'effort, test négatif cliniquement et électriquement pour ischémie
 - Absence de trouble de rythme, de conduction ou de la repolarisation
 - Profil tensionnel d'effort normal, avec PA max ... mmHg
- Sur le plan respiratoire :
 - VEMS de repos ... L (... % théorique) ; Rapport de Tiffeneau
 - Absence d'oscillations respiratoire
 - Pente VE/VCO2 ... normale/augmentée
 - Absence d'amputation de la réserve ventilatoire
- VO2 max ... mL/min/kg (...% théorique), pour QR ...
- SV1 à ... W pour FC ... /(min), à VO2 ... mL/kg/min (... % théorique)
- SV2 à ... W pour FC ... /(min), à VO2 ... mL/kg/min (... % théorique)
- Pour FC max ... /min (... % FMT), avec/sans bradycardisant (posologie)
- Sur le plan périphérique :
- SV1 +/- précoce en faveur d'un déconditionnement
- Au total :

Sources

- 2021 ESC Guidelines on Heart Failure
- 2023 EAPC Consensus Statement on Cardiopulmonary Exercise Testing.
- DIU de cardiologie du sport et système cardiovasculaire et sport

Mots-clés

VO2 max ; Test d'effort ; Insuffisance cardiaque ; Sport ; ENC