

## **BULLETIN SCIENTIFIQUE 2016 (4) : Questions des lecteurs**

### **1-Pourriez-vous nous préciser la notion de VO<sub>2</sub>max ?**

Le terme « VO<sub>2</sub>max » est une abréviation en général utilisée pour définir la **consommation maximale d'oxygène**. Mais l'abréviation abusive telle qu'elle est utilisée mérite quelques remarques.

#### **Attention à ne pas confondre volume et débit d'énergie**

Première remarque, s'il s'agissait d'une quantité, donc d'un volume, il serait licite d'utiliser un « V ». Mais généralement cette expression est utilisée pour définir un **débit d'oxygène maximal** exprimé en litres par minute « l.min<sup>-1</sup> » ou millilitres par minute « ml.min<sup>-1</sup> ». Dans le respect des conventions internationales sur les abréviations il serait nécessaire d'ajouter un point sur le V, voire éventuellement avant le V, pour signifier qu'il s'agit d'un volume rapporté au temps donc d'un débit ( $^{\circ}V = dV/dt$ ). Malheureusement ce type d'abréviation n'existe pas dans la plupart des polices communément utilisées sur les ordinateurs courants ce qui conduit à confondre à tort et de façon abusive deux notions très différentes avec parfois des conséquences graves tant en matière de compréhension que dans certains calculs informatisés.

Pour éviter cette confusion il serait donc préférable d'utiliser directement le terme de **débit énergétique maximal d'oxygène** et une abréviation équivalente « **DEO<sub>2</sub>max** » ou éventuellement **débit énergétique maximal aérobie** « **DEma** ».

#### **Le $^{\circ}VO_2$ max est un excellent témoin du potentiel énergétique individuel**

Deuxième remarque, ce débit d'oxygène maximal est souvent à juste titre considéré comme un témoin majeur de l'aptitude physique individuelle dans la mesure où l'organisme humain comme la plupart des systèmes vivants appartenant au monde animal est un système biologique dit « **aérobie** », c'est-à-dire qu'il tire son énergie de la transformation de différents carburants et d'un comburant, l'oxygène, puisés dans le milieu environnant. Quand les besoins énergétiques deviennent très élevés, comme dans les activités physiques de forte puissance, la consommation d'oxygène devient elle-même très élevée. Il existe d'ailleurs en état stable une très bonne relation entre cette consommation d'oxygène et la puissance développée. Mais pour des puissances de niveau supérieur à une puissance dite « **Puissance Maximale Aérobie** » ou « **PMA** » cette consommation d'oxygène ne suit plus et plafonne. Le sujet a atteint sa consommation maximale d'oxygène.

Mais l'universalité apparente de ce témoin, là encore et par abus de simplification, a conduit à l'affubler d'une espèce de caractère merveilleux et donc à considérer que tout humain possédait donc un «  $^{\circ}VO_2$  max unique et immuable » résultant d'une acquisition génétique ce qui est évidemment faux et aberrant comme nous le verrons par la suite.

#### **Le $^{\circ}VO_2$ max est fonction de l'activité réalisée**

Le débit aérobie maximal d'un système vivant dépend bien évidemment en premier du nombre de « moteurs » c'est-à-dire de cellules actives mises en jeu lors d'une activité énergivore de puissance élevée. Les activités humaines qui mettent en jeu le nombre le plus

élevé de cellules actives sont les activités de déplacement corporel telles que le ski de fond, l'aviron, l'escalade, la course à pied, le ramper, voire la natation... Ce type d'activité dynamique dite « **activité générale** » ou « **activité globale** » se caractérise par une mise en jeu des deux membres inférieurs et des ceintures lombo-abdominales à laquelle s'associent les bras, la ceinture scapulaire et les muscles thoraciques. Les mesures de consommation d'oxygène d'un sujet soumis à différentes activités de ce type donnent des chiffres assez proches pourvu que l'ergomètre utilisé soit spécifiquement adapté à la gestuelle de l'activité en question. En revanche si la masse musculaire est moins importante et que le travail dynamique se limite essentiellement aux jambes comme le cyclisme, aux bras comme le canoë-kayak, voire à une seule jambe ou un seul bras comme dans certains handicaps moteurs, la consommation maximale d'oxygène mesurée est beaucoup plus faible. On dit alors qu'il s'agit d'un travail ou d'une « **activité locale** ».

Il n'y a donc pas un «  $\text{VO}_2\text{max}$  unique par individu » mais « **un  $\text{VO}_2\text{max}$  par individu et par activité** ».

### *Les $\text{VO}_2\text{max}$ changent sous l'effet de multiples facteurs*

Si la programmation génétique est à même de favoriser certains sujets par rapport à d'autres le rôle de l'entraînement physique est bien évidemment essentiel pour révéler et optimiser ce patrimoine génétique. L'insuffisance d'activité crée une involution qui affecte l'ensemble des organes biologiques, involution proche de celle que l'abus d'activité déclenche du fait d'une destruction et d'un vieillissement précoce des structures. Enfin le vieillissement naturel des structures s'accompagne obligatoirement avec l'âge d'une réduction des capacités fonctionnelles et de la plasticité des structures et donc des  $\text{VO}_2\text{max}$ . L'entraînement étant rarement idéal soit par insuffisance commune dans nos sociétés industrialisées qui privilégient le profit immédiat et la voracité par rapport à la dépense et l'investissement, soit par excès dans le sport spectacle et mercantile, il est généralement facile d'améliorer ces chiffres de  $\text{VO}_2\text{max}$  en quelques mois dès que l'on propose un « **ESI** » ou « **entraînement scientifique individuel** » optimisé, adapté au potentiel initial individuel. Enfin ce témoin change aussi en fonction des conditions environnementales : il diminue par exemple en altitude avec la baisse de pression partielle en  $\text{O}_2$ , en atmosphère polluée ou dans des conditions thermiques extrêmes. Il diminue aussi sous l'effet de différentes pathologies, bactériologiques ou virales, de différents médicaments ou toxiques. Il n'y a donc pas un «  $\text{VO}_2\text{max}$  unique par individu » mais « **un  $\text{VO}_2\text{max}$  par individu et par activité et à un moment donné** ».

### **2- Quel $\text{VO}_2\text{max}$ doit-on alors mesurer ?**

La connaissance de son aptitude physique est fondamentale lorsqu'il s'agit d'optimiser la gestion technico-tactique d'une activité spécifique telle que la planification d'un entraînement, d'une rééducation ou la réalisation d'une performance. Dans ce cas le  $\text{VO}_2\text{max}$  le plus important à mesurer est bien évidemment le «  **$\text{VO}_2\text{max}$  spécifique** » correspondant à l'activité spécifique considérée.

Ce débit énergétique aérobie maximal reste cependant insuffisant pour caractériser le potentiel énergétique individuel. En effet, même s'il a valeur d'orientation, il ne permet pas de connaître précisément deux caractéristiques fondamentales de l'aptitude énergétique :

- la première est l'aptitude à s'adapter rapidement à des variations brutales de la puissance d'activité donc aux performances des systèmes de régulation cardiovasculaire et respiratoire mais aussi et surtout métabolique et donc aux cinétiques adaptatives des différents métabolismes producteurs d'énergie dont les témoins essentiels en sont les « **constantes de temps** ». Le terme habituel utilisé pour caractériser cette aptitude est celui de « *résistance* ».

- la deuxième est l'aptitude à maintenir pendant longtemps, pour une activité donnée, un certain niveau de puissance. Cette aptitude est directement liée à deux facteurs : efficacité ou rendement énergétique dans la réalisation de cette activité et volume des réserves énergétiques disponibles. Cette qualité peut être appréciée à partir de la détermination de la consommation d'oxygène correspondant à la puissance dite de transition aéro-anaérobie donc le « **°VO<sub>2</sub>trans spécifique** ». Cette qualité porte généralement le qualificatif de : « *endurance* ».

Par ailleurs si l'objectif prioritaire est d'optimiser l'aptitude énergétique d'un sportif dans un souci de haute performance tout en préservant sa longévité, il est indispensable de coupler cette mesure spécifique à une mesure de « **°VO<sub>2</sub>max global** ». En effet l'entraînement qui consiste à limiter la gestuelle à des activités spécifiques ne mettant pas en jeu des masses musculaires importantes est insuffisant pour améliorer et entretenir les fonctions des organes d'échange, de transport et de distribution d'énergie comme le système cardio-respiratoire. De plus l'amélioration du potentiel énergétique des muscles accessoires ou inutilisés pendant une activité spécifique est un facteur important de la tolérance à différentes formes d'entraînement spécifique dans la mesure où ils sont susceptibles d'accélérer la métabolisation de déchets organiques nocifs et donc la récupération.

### **3-Pourriez-vous nous préciser la notion de °VO<sub>2</sub>trans ?**

Le terme °VO<sub>2</sub>trans est une abréviation utilisée pour définir la **consommation d'oxygène de transition aéro-anaérobie** correspondant, dans une activité spécifique, à une puissance elle-même qualifiée de puissance de transition aéro-anaérobie.

Cette transition aéro-anaérobie est une zone métabolique caractérisée par un **équilibre entre deux débits énergétiques** : celui de production et celui d'utilisation. Pour appréhender cette notion il est nécessaire de rappeler que l'énergie mécanique restituée au milieu extérieur grâce à l'activité musculaire provient de plusieurs types de carburants dont les deux principaux sont les réserves de sucres et de graisses. A partir de ces réserves, quelques dizaines de réactions gérées par des enzymes vont conduire les molécules complexes de glucides et de lipides à se dégrader jusqu'à produire finalement de l'eau, H<sub>2</sub>O, et du dioxyde de carbone, CO<sub>2</sub>. A certaines étapes de ces transformations, l'énergie de liaison de ces molécules sera utilisée pour synthétiser l'ATP, « supercarburant » de la contraction musculaire. Si les lipides ne peuvent se dégrader qu'en présence d'O<sub>2</sub>, en revanche les premières réactions de dégradation des glucides qui conduisent à l'acide pyruvique et l'acide lactique n'ont nul besoin d'O<sub>2</sub> et sont dites « **anaérobies** » ; puis, à partir de ces intermédiaires, les réactions qui conduisent à la production d'H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> nécessitent de l'oxygène ; elles sont dites « **aérobies** ».

Pour les activités de **puissance faible et stable** sans variations temporelles de puissance, le carburant prioritaire est **lipidique**. Plus l'activité réalisée est de **puissance élevée** ou caractérisée par des **variations brutales de puissance**, plus le pourcentage de **glucides** consommés devient alors important. Mais pour une même quantité de glucides consommée la

dégradation initiale incomplète anaérobie produit environ 13 fois moins d'énergie mécanique que la dégradation complète aérobie. La dégradation anaérobie s'accompagne en plus d'une production très supérieure de différents produits (radicaux libres, protons H<sup>+</sup>, ammoniac, lactate, etc....) ayant des effets délétères de déformation voire de destruction sur les structures protéiques cellulaires et les enzymes qui régulent ce métabolisme énergétique. Les conséquences biologiques des activités supra-maximales, intenses et répétitives, se caractérisent non seulement par un **rendement énergétique faible** mais aussi par des **conséquences pathologiques** locales portant sur l'appareil locomoteur et générales sur différents appareils comme le système cardiovasculaire.

Pour une personne d'aptitude moyenne soumise à différents niveaux d'activité :

- Pour une activité faible mettant en jeu par exemple **environ 35% °VO<sub>2</sub>max**, la production d'intermédiaires comme le lactate est inférieure à son utilisation : ce type d'activité « **sous-transitionnelle** » représente alors une excellente activité dite de « **récupération active** ».

- **Vers 65% °VO<sub>2</sub>max** l'activité de cette personne se situe au niveau de son °VO<sub>2</sub>trans : la production de lactate est alors identique à son utilisation et la lactatémie dans le sang circulant est stabilisée. Le niveau de stabilisation de la lactatémie est bien évidemment fonction de l'intensité des exercices ayant précédé cette activité : si la période qui précède est très énergivore la lactatémie se stabilise à un niveau élevé par exemple 5 ou 6 mmol.l<sup>-1</sup> ; si l'épisode antécédent est faible, par exemple un échauffement progressif, la lactatémie se stabilise à un niveau plus bas par exemple 2 à 3 mmol.l<sup>-1</sup>. Il s'agit là d'une activité de « **puissance transitionnelle** » proche de « **l'entraînement scientifique individuel ou ESI** ».

- **Au-delà de 100% °VO<sub>2</sub>max** le niveau de dépense énergétique devient supérieur à celui de la puissance maximale aérobie ; le plafonnement de l'apport en oxygène limite l'apport énergétique aérobie ; le surplus de besoin énergétique est uniquement satisfait par le métabolisme anaérobie qui s'accompagne d'une élévation encore plus rapide des métabolites intermédiaires dont le lactate est l'un des meilleurs représentants. En référence à la puissance maximale aérobie, cette activité est alors généralement qualifiée de « **supra-maximale** ».

#### 4-Comment mesurer le °VO<sub>2</sub>max spécifique?

##### La détermination « directe » de °VO<sub>2</sub> max

Elle nécessite de réaliser un exercice atteignant ou dépassant la puissance aérobie maximale présumée (PMA) afin de mesurer et d'observer le **plafonnement de la consommation d'oxygène** de la personne soumise à cet exercice. Il faut donc s'adresser à un service spécialisé qui possède les outils correspondant, un ergomètre adapté à l'activité concernée, un protocole d'augmentation de puissance correct, un système de mesure des échanges gazeux en circuit ouvert performant, un matériel de monitoring cardiovasculaire ainsi qu'un personnel compétent susceptible de faire passer la santé du patient et la qualité de l'examen avant les impératifs marchands de l'administration.

S'il s'agit d'une épreuve de puissance progressivement croissante, dite triangulaire, sa durée **après échauffement** ne doit pas être inférieure à une dizaine de minutes. Pour éviter un arrêt précoce par épuisement avant l'atteinte de « PMA », il est indispensable que le protocole limite aussi au maximum la participation du métabolisme anaérobie :

- les augmentations successives de puissance comme les durées des paliers doivent donc être les plus petites possibles, l'idéal étant de proposer une **augmentation linéaire de puissance** ciblée sur la puissance maximale aérobie présumée en **13 à 14 minutes** ;
- lors des exercices de pédalage de jambes ou de bras il est indispensable que la cadence imposée soit proche de la « **cadence efficace optimale** » de meilleur rendement et donc généralement supérieure à 80rpm pour les puissances élevées.

### La détermination « indirecte » de °VO2 max

Malheureusement les épreuves d'effort dites « **directes** » sont de plus en plus galvaudées, trop rapides, non maximales, voire sans mesure d'échanges gazeux. Pour les personnes possédant ou se faisant prêter un **cardio-fréquencemètre** par leur CSTB, il reste cependant possible d'obtenir à titre personnel une excellente estimation de °VO2max spécifique sur le terrain par technique « **indirecte** ». Bien pratiquée, cette technique indirecte finit même par fournir des résultats de qualité supérieure à la technique qui en réalité n'a plus de « directe » que le nom.

Pour ce faire il faut connaître quelques données fondamentales individuelles telles que : âge, sexe, poids tout équipé et **fréquence cardiaque maximale (FCmax)** enregistrée lors d'une épreuve en service spécialisé ou lors d'activités de terrain épuisantes. Il suffit alors de reproduire, sur un « **circuit labellisé MeRCI-astb©** », un exercice triangulaire à cadence de pas progressivement croissante soit spontanée soit guidée par un petit métronome électronique. Vous pouvez aussi n'utiliser qu'une seule séquence de ce circuit, si possible plate et de bonne qualité, d'environ 100 mètres, en y effectuant des allers et retours à cadence progressivement croissante comme lors de la séance d'échauffement ou du test d'étalonnage cadence-vitesse déjà réalisés dans le cadre de la formation moniteur PS1. Relevez à l'aplomb des balises du Photo-guide ou à chaque aller-retour les **temps de passage** et les **fréquences cardiaques**. Cet exercice de 20 à 30 minutes est interrompu au voisinage de la fréquence cardiaque individuelle, soit de transition lorsqu'elle est connue, soit « cible » ou « limite » fournie par le service spécialisé ayant préalablement réalisé une épreuve d'effort. Ces données, transmises au département médical de l'ASTB seront traitées par le modèle mathématique de bioénergétique humaine Astrabio© qui possède toutes les caractéristiques physiques de l'ergomètre de terrain utilisé permettant de calculer le °VO2max recherché.

### 5-Ces préconisations s'appliquent-elles aux séniors ?

Pour les séniors, avant toute reprise ou toute augmentation d'une activité physique, en particulier chez les séniors fragilisés après un accident neurologique, cardio-respiratoire, une immobilisation prolongée, une hospitalisation, une maladie métabolique, un traitement lourd, etc..., il est indispensable de réaliser un test d'effort en **service spécialisé**.

Cette épreuve d'effort a un double objectif : sur le plan **diagnostique** elle doit infirmer ou confirmer la présence d'une éventuelle **pathologie limitant l'aptitude** physique en particulier cardiovasculaire ; sur le plan thérapeutique elle doit mettre en place une médication adaptée dans laquelle le réentraînement est essentiel : il est donc fondamental que soit précisé le niveau de **dépense énergétique de transition** si le sujet est sain ou celui de **dépense énergétique de rééducation** adapté à l'aptitude résiduelle si le sujet présente une pathologie invalidante.

Si le service spécialisé est dans l'incapacité de fournir ces précisions il doit obligatoirement fournir au minimum l'un des six témoins physiques ou biologiques caractéristiques des « **cibles** » ou des « **limites** » qui permettent d'estimer la dépense énergétique à proposer dans un plan thérapeutique de rééducation ou de réentraînement optimisé de type « ESI ».

- Trois sont des **témoins physiologiques** : la dépense énergétique ou consommation d'oxygène, la fréquence cardiaque et la fréquence respiratoire.
- Trois sont des **témoins mécaniques** : la puissance sur bicyclette ergométrique, et sur tapis roulant la vitesse de marche et la cadence de marche.

Le sénior doit ensuite réaliser sur un « **circuit labellisé MeRCI-astb©** » l'exercice test décrit au chapitre précédent : détermination indirecte de  $\dot{V}O_{2max}$ . Une seule adaptation peut éventuellement concerner les séniors fragilisés : il s'agit de la fréquence cardiaque cible (FCcible) de fin d'épreuve indirecte. En effet, même si la fréquence cardiaque de transition (FCtrans) est généralement confondue avec la fréquence cardiaque limite (FClim) fournie par le service spécialisé, il est préférable en première intention de ne pas dépasser cette indication.

## **6-Peut-on mesurer simplement $\dot{V}O_{2trans}$ ?**

### **La détermination « directe » de $\dot{V}O_{2trans}$**

La technique de référence dite de « **l'équilibre lactate** » est très lourde : elle nécessite de réaliser plusieurs exercices spécifiques d'environ une heure, à plusieurs jours d'intervalle, de puissance constante, censés encadrer la puissance de transition. Lors de chaque séance, l'observation de la cinétique de lactatémie permet de sélectionner la puissance réelle ou théorique et le  $\dot{V}O_{2}$  correspondant caractérisés par un débit de production de lactate dans l'espace circulatoire identique au débit d'épuration et l'absence de dérive métabolique.

Une solution plus simple mise au point par l'ASTB dite du « **minimum lactate** » consiste à réaliser deux épreuves triangulaires successives identiques. Le suivi des cinétiques de lactatémie permet de mettre en évidence lors du second triangulaire la puissance caractérisée par un débit d'épuration de la charge lactique initiale identique au débit de production. La cinétique lactate lors du deuxième triangulaire présente une allure parabolique à concavité tournée vers le haut dont le lissage mathématique permet de définir facilement le minimum caractéristique de « l'équilibre lactate ».

Quoi qu'il en soit ces techniques restent **difficilement applicables en routine sur le terrain.**

### **La détermination « indirecte » de $\dot{V}O_{2trans}$**

Les techniques indirectes font appel pour la plupart d'entre elles aux effets secondaires de l'apparition d'une dérive métabolique et d'une accumulation de certains métabolites sur l'adaptation physiologique de certains appareils à une activité triangulaire de puissance progressivement croissante. L'augmentation de la respiration par exemple présente une allure de type exponentiel quand la puissance augmente linéairement. Plusieurs traitements de cette évolution temporelle ont été proposés afin de distinguer des phases particulières assimilées à

des évolutions linéaires séquentielles : la première allant du repos à un premier seuil « SV1 » parfois appelé « seuil aérobie », la seconde allant jusqu'à un deuxième seuil « SV2 » appelé « seuil anaérobie ».

Même si la fonction d'échanges gazeux et donc de régulation de l'équilibre acide-base est prioritaire dans la plupart des espèces animales, il est nécessaire de se souvenir qu'au moins deux autres fonctions certes non prioritaires sont dévolues à l'appareil respiratoire : **fonction de thermolyse** (élimination calorique) et **fonction de communication** (chant, parole). La thermolyse humaine étant essentiellement assurée par l'évaporation sudorale, sauf conditions très particulières, l'incidence thermique sur l'adaptation respiratoire reste faible. En revanche, et en particulier lorsque la dépense énergétique est faible, la maîtrise volontaire comme de nombreux facteurs psychologiques sont à même de modifier le comportement respiratoire normal et le débit expiratoire  $\dot{V}_E$  tout en respectant une ventilation alvéolaire compatible avec les besoins d'échanges gazeux. Cette **variabilité** importante de l'évolution de la respiration autour d'une courbe adaptative théorique disparaît progressivement quand les besoins énergétiques augmentent en particulier lorsqu'on dépasse la zone de « l'équilibre lactate » et que l'on rentre dans une zone de dérive métabolique.

Ces considérations ont amené la Société Française de Médecine du Sport lors d'une séance de consensus à adopter l'avis de l'ASTB et à considérer que la définition même de ces seuils n'avait pas de signification métabolique précise et qu'aucune des techniques de détermination indirecte analysées n'était suffisamment fiable pour être en mesure d'en proposer une recommandation officielle. Pour remédier à ce constat deux décisions ont été prises par l'ASTB: d'une part remplacer la notion de seuils par celle de **zone de transition aéro-anaérobie** ; d'autre part utiliser un mode d'exploitation mathématique à la fois plus simple et moins aléatoire, donc non séquentiel, fondé sur l'exploitation de **tous les points expérimentaux** ; exploitation répondant aux fondements de **la régulation physiologique** respiratoire qui adapte ce système aux exigences énergétiques et dont la sensibilité, pour une dépense énergétique donnée  $\dot{V}O_2$ , s'exprime par la tangente  $d\dot{V}_E/d\dot{V}O_2$  en ce point.

Cette technique intégrée au modèle mathématique de bioénergétique humaine Astrabio© consiste donc simplement à utiliser tous les points expérimentaux pour établir la relation  $\dot{V}_E = f(\dot{V}O_2)$  ou la relation  $FR = f(\dot{V}O_2)$  ainsi que l'équation générale des tangentes de pente  $d\dot{V}_E/d\dot{V}O_2$  ou  $dFR/d\dot{V}O_2$  enveloppes respectives de ces courbes. La tangente au point  $\dot{V}O_{2\text{repos}}$  est caractéristique des stimuli liés au métabolisme de repos « aérobie » ; la tangente au point  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  est caractéristique des stimuli observés lors de la dérive métabolique liée à la participation progressive du métabolisme « anaérobie ». **L'intersection des deux tangentes** définit un point dont le débit énergétique correspondant  $\dot{V}O_2$  trans permet de caractériser la **zone de transition aéro-anaérobie**. La mesure de FR par pneumofréquencemètre permet une approche simple de cette détermination sur circuit labellisé au cours d'un **test triangulaire classique d'étalonnage-échauffement-suivi**. Il suffit de noter au passage des balises, en plus des temps et des FC, les fréquences respiratoires FR.