



Association pour la Recherche et l'Évaluation en Activité Physique et en Sport

EVALUATION DES CAPACITES PHYSIOLOGIQUES ET PHYSIQUES

- 1. Considérations générales**
- 2. Evaluation des capacités dites « Anaérobies »**
- 3. Evaluation des capacités aérobies**

3. Evaluation des capacités aérobies

Cours du Diplôme d'Université Médecine du Sport

Marrakech 19 – 21 décembre 2014

Georges CAZORLA

Courriel : areaps33@gmail.com

Web : www.areaps.org

3 - EVALUATION DE L'APTITUDE AEROBIE

Comme chacun des métabolismes, l'aptitude aérobie se caractérise par une capacité, une puissance maximale et une endurance. Ces trois composantes dépendent des réserves en substrats oxydables de l'organisme (essentiellement glucides et lipides) et de l'efficacité de la chaîne qui extrait l'oxygène de l'environnement (diffusion alvéolo-capillaire), le transporte jusqu'aux fibres actives (concentration en hémoglobine, hémato-crite, débit cardiaque) et l'utilise (diffusion périphérique, nombre de capillaires fonctionnels, pouvoir oxydatif : mitochondrie et équipement enzymatique des fibres musculaires) pour répondre à des activités de longue durée.

3.1- Quelques définitions préalables.

Nous venons d'utiliser trois concepts qui seront ensuite largement repris dans ce chapitre, aussi convient-il d'en proposer les définitions que nous leur attribuons.

La capacité aérobie représente la quantité totale d'énergie potentielle susceptible d'être fournie par voie oxydative. Comme elle dépend des réserves totales de substrats utilisables (ou « carburant » de l'organisme) : glycogène, glucose circulant, acides gras libres, voire même dans certaines circonstances, acides aminés... et bien sûr, de la totalité de l'oxygène (ou « comburant ») utilisé pour leur combustion, son évaluation directe est impossible. Par contre on peut indirectement en apprécier l'importance par l'évaluation de ses deux composantes qui sont : la puissance maximale et l'endurance.

La puissance aérobie maximale (P.A.M.) est la quantité maximale d'oxygène qu'un organisme peut utiliser **par unité de temps** (généralement par minute) au cours d'un exercice musculaire intense et d'une durée égale ou supérieure à trois minutes. Elle correspond au $VO_2 \text{ max}$ (V = débit ; O_2 = oxygène ; max = maximal) ou consommation maximale d'oxygène.

L'endurance aérobie (E.A.) est la **fraction** ou le **pourcentage** de $VO_2 \text{ max}$ ou de la P.A.M. ou encore de la vitesse aérobie maximale (V.A.M.) susceptible d'être maintenue au cours d'une épreuve d'une **durée donnée**. Par exemple courir pendant 12 min (test de Cooper) ou un 5000, un 10000, un 20000 m, un semi-marathon ou un marathon et calculer ensuite à quel pourcentage moyen de la V.A.M. correspond la performance réalisée.

L'E.A. est aussi la durée d'une activité susceptible d'être maintenue à un **pourcentage donné** de $VO_2 \text{ max}$, de la P.A.M. ou de la V.A.M. Par exemple fixer un pourcentage de la V.A.M. (85, 90, 95 ou 100 %) et chronométrer la durée maintenue à cette vitesse.

Dans les deux cas, l'évaluation de l'endurance aérobie nécessite de connaître préalablement la vitesse aérobie maximale.

La vitesse aérobie maximale (V.A.M.) ou puissance aérobie maximale fonctionnelle (P.A.M.F.) est la vitesse limite atteinte à $VO_2 \text{ max}$. Elle résulte de l'interaction de trois facteurs : 1- de $VO_2 \text{ max}$, 2- du rendement de la locomotion (course, cyclisme, natation...)

encore défini comme efficacité ou économie de locomotion utilisé et 3- de la motivation pour pouvoir atteindre VO_2 max au cours d'une épreuve intense et prolongée (Figure 13).

L'économie de locomotion (de course, de nage, de pédalage...) représente le plus faible coût énergétique pour se déplacer à une vitesse donnée ou mieux, à un pourcentage donné de VO_2 max ou de la V.A.M.

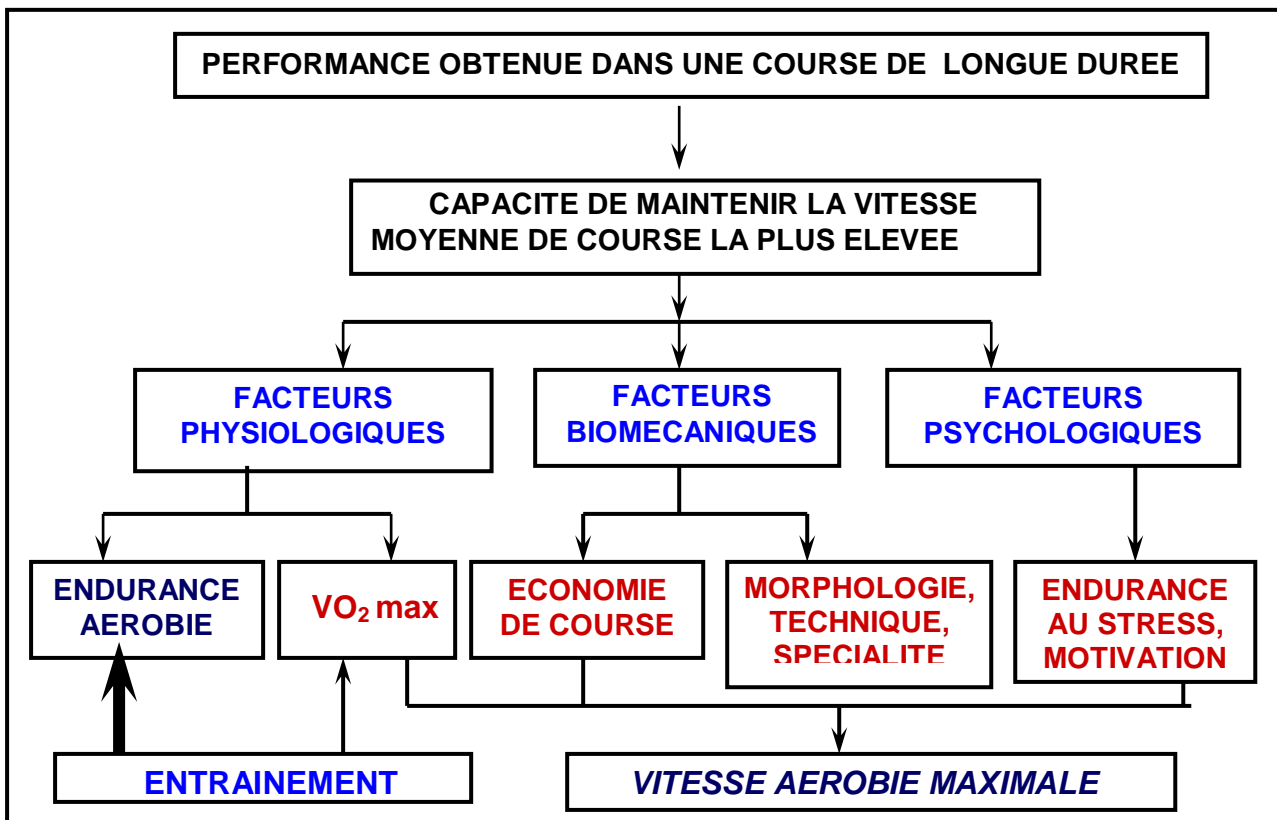


Figure 13 : Les facteurs de la performance de longue durée. Endurance, puissance aérobie maximale (ou VO_2 max), vitesse aérobie maximale (ou VAM) et économie de gestes ou de locomotion, constituent aussi les facteurs de la capacité aérobie. C'est de leurs interactions que dépend la performance de longue durée.

3.2 - Evaluation de VO_2 max.

L'évaluation de VO_2 max peut être réalisée de façon directe par la mesure des gaz expirés au cours d'épreuves intenses, de longue durée et engageant au moins les deux tiers de la masse musculaire totale ou indirecte en extrapolant VO_{2max} à partir de la connaissance d'autres variables avec lesquelles il est associé ; relation : fréquence cardiaque-vitesse de course ou puissance mécanique. VO_2 max peut être obtenu à partir d'épreuves maximale ou extrapolé à partir d'épreuves inframaximales. Les protocoles de ces épreuves peuvent être à intensité constante, ils sont dits alors rectangulaires (figure 14), ou à intensité progressive et sont définis comme triangulaire. Les protocoles triangulaires peuvent eux-mêmes se subdiviser :

- en épreuves continues à accélération constante dites en rampe ou à accélération par paliers plus ou moins longs et sont définis comme épreuves triangulaires continues en escalier (figure16) :

- ou en épreuves discontinues avec arrêts de durées variables entre chaque palier pour permettre par exemple, des prélèvements à des fins de dosages biologiques (figure 15) :

Devant cette abondance, nombreux sont les praticiens qui, aujourd'hui, s'interrogent avant de choisir le test correspondant le mieux à leur(s) besoin(s) et à leur(s) moyen(s) aussi convient-il de définir leur critères de validité.

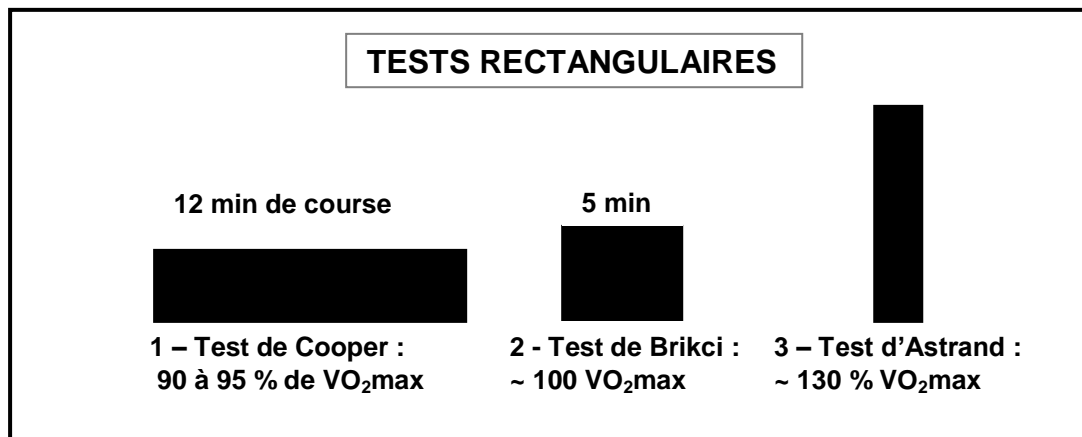


Figure 14 : Exemples d' épreuves rectangulaires accompagnées de leurs intensités relatives.

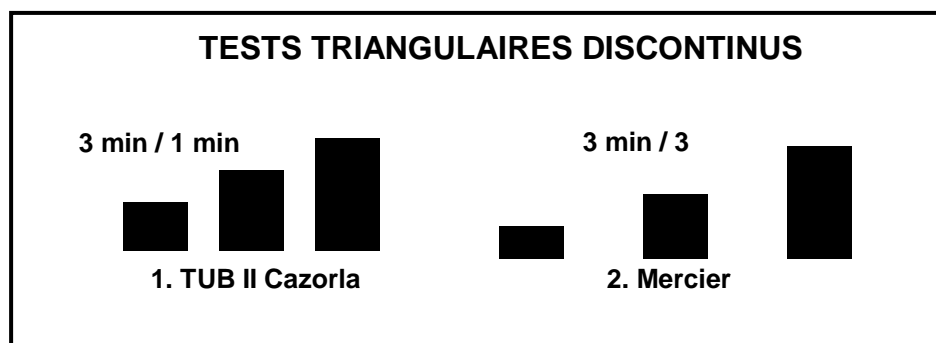


Figure 15 : Exemples d'épreuves triangulaires accompagnées du nom de leurs concepteurs

Critères de validité

En laboratoire : VO_2 mesuré

Afin d'avoir l'assurance que le sportif évalué a bien atteint son maximum, la consommation maximale d'oxygène obtenue par mesures directes doit répondre à plusieurs critères :

- le sujet s'arrête parce qu'il est réellement épuisé,
- l'augmentation de sa fréquence cardiaque et de son VO_2 s'infléchissent et plafonnent,
- son quotient respiratoire (VCO_2/VO_2) atteint des valeurs supérieures à 1.10,
- sa concentration sanguine en lactate est supérieure à 9 mmol.l^{-1}

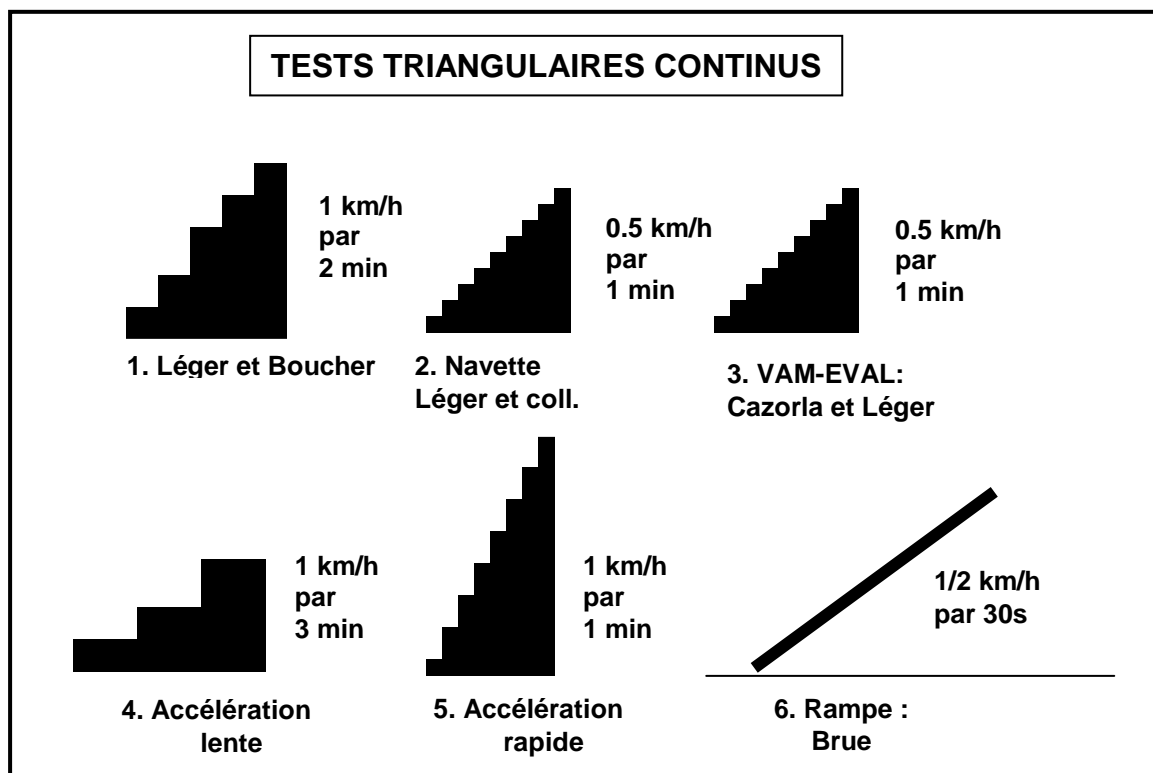


Figure 16 : Exemple d'épreuves triangulaires et continues

Protocole utilisé

Les épreuves triangulaires sont actuellement préférées aux épreuves rectangulaires mais toutes ne répondent pas aux critères de validité pour amener le sujet à son VO_{2max} et éventuellement obtenir sa PAM ou sa VAM. Ces critères doivent tendre à obtenir un état métabolique stable à chaque palier. Pour ce faire :

- les paliers ne doivent être ni trop courts (intervention des capacités anaérobies, état stable non atteint entraînant une sous estimation de l'économie de locomotion et une sur estimation de la PAM ou de la VAM), ni trop longs (état de fatigue entraînant une PAM ou une VAM sous estimée) figure 17. Les durées des paliers dépendent de l'augmentation de l'intensité : vitesse ou puissance) à chaque nouveau palier. En général, lorsque le protocole est continu, des paliers de 2min ont été validés pour des augmentations de vitesse de course de 1km/h.
- l'augmentation de l'intensité ne doit pas être trop brutale. Les augmentations de vitesses les plus valides sont :
 - . pour les protocoles continus : 1/2 km/h pour des paliers de 1min, 1km/h pour des paliers de 2min, la limite étant de 2km/h pour des paliers de 3min.
 - . pour les protocoles discontinus avec des arrêts de 1min l'augmentation de la vitesse doit être de 1km/h pour des durées de palier de 3min.
- enfin, la durée totale de l'épreuve continue ne doit pas excéder 20min.

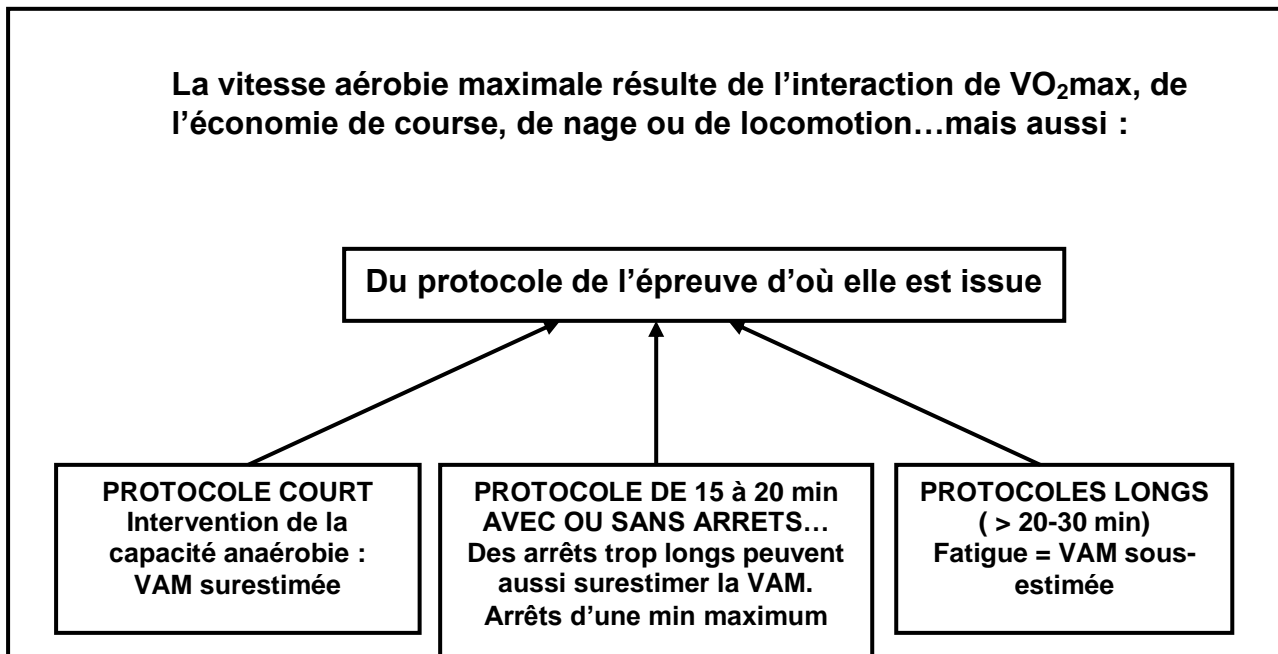


Figure 17 : Différentes conditions expérimentales susceptibles de surestimer ou de sous-estimer la vitesse aérobie maximale à l'issue d'épreuves triangulaires.

Ergomètres utilisés

Selon l'ergomètre utilisé les valeurs de VO_{2max} du même sportif peuvent être très différentes. D'une façon générale les valeurs obtenues en course sur tapis roulant sont supérieures à celles obtenues sur un cycloergomètre standard de laboratoire. Dans certaines disciplines comme la natation et le cyclisme les valeurs obtenues au cours de la nage sont en moyenne de 10% inférieures à celles de la course. Par contre les cyclistes peuvent obtenir des valeurs équivalentes sur cyclo-ergomètre spécifiquement adapté.

Actuellement de plus en plus les mesures métaboliques sont réalisées directement dans la discipline du sportif : natation, ou au moyen d'ergomètres spécifiquement conçus : Cyclisme, ski, patinage, aviron... ou encore directement au cours de l'activité elle-même grâce à des analyseurs miniaturisée de gaz directement portés par le sujet. Les valeurs spécifiques obtenues sont plus riches de renseignements mais perdent en fidélité.

Sur le terrain : VO_{2max} estimé et mesure directe de la VAM

Les mêmes critères de validité sont à appliquer aux protocoles utilisés sur le terrain (figures : 14, 15, 16 et 17).

Ces protocoles se répartissent aussi en épreuves :

rectangulaires : la plus grande distance parcourue en 12 min de Cooper, 1968

- ❑ progressive de course navette de Léger et Lambert (1982),
- ❑ progressive de course sur grand terrain de Léger et Boucher (1980),
- ❑ progressive Vam-éval de Cazorla et Léger (1993),

- progressive de course derrière cycliste de Brue (1985),
- progressive de course à paliers de 3 min, ou test de l'Université de Bordeaux 2 (TUB₂, Cazorla 1990).

Leur niveau de pertinence

Le niveau de pertinence est dicté par l'objectif ou les objectifs que se fixe l'utilisateur d'un test donné. C'est d'ailleurs à cet endroit que l'on observe les plus grandes confusions, aussi faut-il se poser les bonnes questions relatives aux utilisations possibles.

- S'agit-il d'établir un simple diagnostic initial sur le niveau de développement de la capacité aérobie ? Dans ce cas seul *un indice de l'aptitude aérobie* suffit et n'importe lequel des six tests précédents peut être retenu.
- Veut-on évaluer *la puissance aérobie maximale* d'un ou de plusieurs sujets ? Hormis le test de Cooper, tous les autres le permettent avec cependant une meilleure validité obtenue avec les tests navette de *20 m de Léger et Coll. (1985)*.
- S'agit-il encore d'obtenir une vitesse limite référence ou *vitesse aérobie maximale (VAM)* afin de mieux orienter et contrôler les intensités d'entraînement ? Dans ce cas un simple indice aérobie ne suffit plus. Ne disposant que d'un chronomètre et de distances, l'enseignant d'EPS, l'entraîneur et le sportif ont surtout besoin de références chronométriques pour élaborer les contenus de leurs entraînements. Plus que la connaissance de VO₂max, c'est celle de la vitesse limite de course atteinte à VO₂max ou vitesse aérobie maximale (VAM) qui leur est indispensable. A partir de cette vitesse, peuvent facilement être programmées les intensités et les durées optimales utiles de course et être connues leurs répercussions physiologiques. Dans cette perspective, nous avons développé un logiciel (biologique) qui permet de traduire ces intensités et leurs pourcentages par rapport à la VAM, en temps de passage à des intervalles de distances choisies ou en distances à parcourir pour des intervalles de durées connues.

Les tests progressifs de course sur piste : VAMEVAL, Léger et Boucher, Brue et TUB₂ peuvent parfaitement répondre à ce type d'utilisation.

- S'agit-il enfin d'obtenir non seulement la VAM mais aussi d'explorer les vitesses intermédiaires correspondant aux limites des mises en jeu métaboliques aérobie, anaérobie et mixte ainsi que les réponses cardiaques en état stable et au cours d'intervalles de récupération ?
- Dans ce cas le test de l'Université de Bordeaux 2 (TUB₂) permet de répondre à ces différents objectifs.

Le tableau 5 ci-dessous récapitule la pertinence du choix éventuel des six différents tests les plus connus.

TESTS	RÉSULTATS	OBJECTIFS (*)				
		ICA	PAM	VO ₂ max	VAM	PMT
.12min de course	Plus grande distance parcourue	oui	non	non	non	non
: .2400 m : Cooper	Plus petite durée	oui	non	non	non	non
.course navette 20m Leger et al.	Dernier palier complété	oui	oui	oui	non	non
.course sur piste Léger et Boucher	Dernier palier complété	oui	oui	oui	oui	non
vaméval Cazorla et Léger	Durée dans le dernier palier	oui	oui	oui	oui	non
.Course-derrière cycliste, Brue	Durée dans le dernier palier	oui	oui	non	oui	non
.TUB ₂ : paliers 3 min, Cazorla,	Durée dans le dernier palier	oui	oui	oui	oui	Oui

Tableau 5 : Pertinence du choix d'un test. Aide à l'orientation de ce choix en fonction des objectifs de l'utilisateur. (*) ICA : indice de capacité aérobie ; PAM : puissance aérobie maximale ; VO₂ max : consommation maximale d'oxygène ; VAMS : Vitesse aérobie maximale spécifique ; PMT : plages métaboliques transitionnelles.

Niveau de validité

Il s'agit ici d'avoir la preuve expérimentale que chacun des tests sélectionnés mesure effectivement ce qu'il est censé évaluer. Le niveau de corrélation calculé entre le facteur directement mesuré et le résultat du test permet de vérifier sa validité. Si la corrélation est élevée, connaissant le résultat du test il est permis d'extrapoler le facteur à évaluer. L'inverse est aussi possible.

Selon les deux objectifs principaux assignés aux tests précédents, peut-on affirmer qu'ils mesurent effectivement VO₂ max et la vitesse aérobie maximale ?

Validité et VO₂ max

Bien que la connaissance de VO₂ max ne s'avère pas indispensable aux entraîneurs, aux éducateurs et aux sportifs, certaines épreuves sont très fortement corrélées à VO₂max. Elles permettent d'extrapoler la consommation maximale d'oxygène avec un risque inférieur à la

plupart des tests indirects de laboratoire. En fonction de l'âge des sujets, la course navette de Léger et al. (1985) présente un niveau de corrélation compris entre 0,70 (n = 188 enfants) et 0,90 (n = 77 adultes).

L'épreuve de course sur grand terrain (Léger et Boucher, 1980) n'est par contre validée que pour prédire le VO_2 max de sujets adultes (r = 0,96 ; n = 25 adultes). Par contre le résultat de ce test permet aussi une très bonne prédiction des performances de demi-fond (r = 0,96 ; n = 23 adultes) et de fond (r = 0,96 ; n = 24 adultes). Il en est de même du test de Brue (1985) : r (1500m) = 0,96 ; n = 12 et r (3000m) = 0,91 ; n = 11. Ces trois tests sont donc respectivement validés pour prédire VO_2 max (navette et course sur piste) et la performance de longue durée (course sur piste et Brue), ce qui n'est pas le cas du test de Cooper qui, selon les populations étudiées et selon les auteurs, présente des niveaux de corrélation non significatif (r : 0.24) à très significatif (r: 0.94). Cette grande variabilité interdit d'adopter sans réserve cette épreuve pour prédire le VO_2 max.

Niveau de validité et VAM

Le concept de vitesse aérobie maximale (VAM) ou vitesse limite atteinte à VO_2 max (V max) suscite actuellement un grand intérêt chez les entraîneurs, les enseignants d'EPS et les sportifs. A partir de la lecture du tableau 5 il est aisé d'en percevoir les raisons. La connaissance de cette vitesse chez un individu donné n'est cependant pas aussi simple qu'elle en a l'air. En effet, la VAM dépend non seulement de multiples interactions biomécaniques et physiologiques (figures 13 à 17) mais aussi du protocole du test censé l'obtenir.

Au nombre des interactions, le VO_2 max, le rendement énergétique encore défini comme l'économie de course et ...la motivation en sont les principales.

Ainsi la VAM résulte à la fois de l'économie de course et du VO_2 max. Connaissant la VAM, VO_2 max ne peut être extrapolé qu'en tenant compte de l'économie de course qui, selon les individus peut varier entre $\pm 5\%$.

Un autre point et non des moindres est que la VAM peut aussi varier en fonction du protocole du test. D'une manière générale, plus l'augmentation de la vitesse des paliers est brutale et de courte durée, plus la VAM a des chances d'être surestimée. Dans ce cas, une part importante de la VAM est liée à la production anaérobie de l'énergie (Figure 17)..

A l'inverse, plus la durée du protocole est importante, plus la VAM risque d'être sous estimée probablement à cause des effets de la fatigue qui limitent la poursuite de l'exercice

Autrement dit, il existe autant de VAM qu'il existe de protocoles, ce qui peut expliquer pourquoi des différences souvent importantes sont obtenues au niveau des durées pendant lesquelles les sujets évalués sont capables de courir à 100% de leur VAM. Rappelons que l'endurance aérobie étant définie comme « **le pourcentage de la puissance aérobie maximale** (ici représentée par la VAM) **susceptible d'être maintenu le plus longtemps possible** » de nombreux auteurs utilisent la durée de course à 100% de VAM pour l'évaluer. La durée de course à 100% de VAM serait de 7 min avec des sujets moyennement endurants. Il est évident que cette durée devrait être inférieure en utilisant les autres tests et plus particulièrement les tests de course à accélération rapide.

Aussi, afin d'éviter les actuelles confusions, nous suggérons d'utiliser le concept de VAM *spécifique* en précisant le test avec lequel elle a été obtenue (ex : VAM Léger-Boucher, VAM TUB₂, VAMEVAL, VAM Brue) plutôt que le concept unique de VAM.

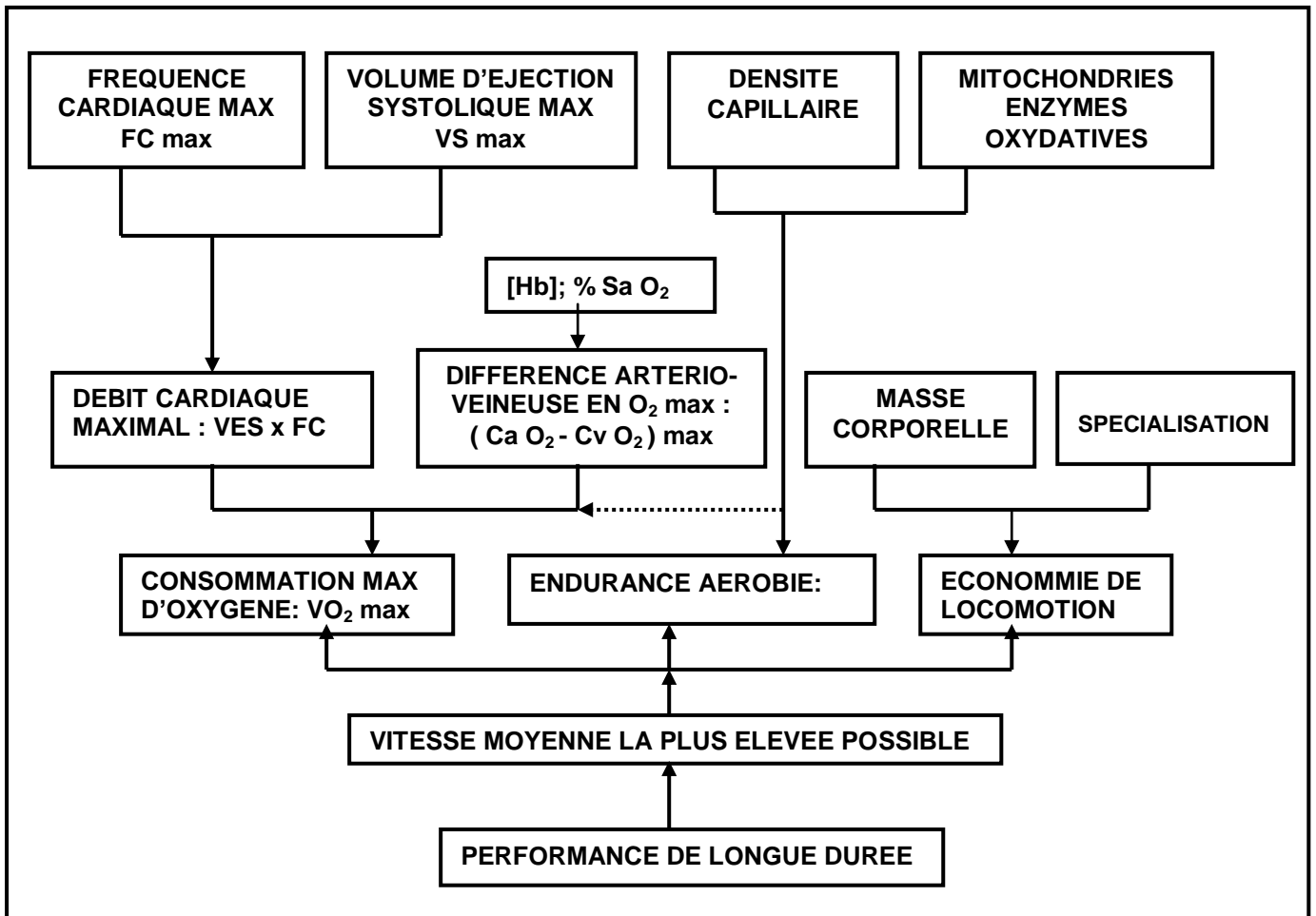


Figure 18 : Différentes interactions physiologiques et biomécaniques à l'origine de la performance de longue durée.

Remarques :

1• Le test VAMEVAL a été élaboré pour rendre le test Léger et Boucher plus accessible et plus précis. La pente d'augmentation de l'intensité étant rigoureusement la même : $\frac{1}{2} \text{ km.h}^{-1}$ par palier de 1 min à la place de 1 km.h^{-1} par palier de 2 min, le test VAMEVAL bénéficie indirectement du niveau de validité du test de Léger et Boucher. Par contre les VAM obtenues s'avèrent plus précises au $\frac{1}{2} \text{ km.h}^{-1}$ près avec le test VAMEVAL.

2• Une étude très récente n'a montré aucune différence significative entre les VAM obtenues au VAMEVAL et celles obtenues au TUB₂. On peut donc indifféremment utiliser ces deux tests pour obtenir la VAM.

Niveau de fidélité

Le niveau de fidélité d'un test est défini par les résultats obtenus par les mêmes sujets passant deux fois le même test à peu de jours d'intervalle. Le test est dit fidèle lorsque les résultats entre test et re-test demeurent stables : pas de différence significative et corrélation proche de 1. Hormis le test de Cooper, la standardisation rigoureuse et enregistrée sur bande sonore des tests progressifs de course navette de 20 m, de course sur piste (Léger-Boucher, VAMEVAL, TUB₂) et de course derrière cycliste, leur confère une grande fidélité externe (liée aux conditions extérieures au sujet) à la condition de vérifier la vitesse de défilement du magnétophone utilisé et de les faire passer dans les mêmes conditions environnementales (piste, climat, heure de la journée...).

Remarquons cependant que le niveau de fidélité interne (propre au sujet) peut varier entre deux tests lorsque l'évalué découvre le test pour la première fois. Chez des enfants et des adolescents nous avons trouvé une étendue de différences en plus lors du re-test allant de 5 à 10 % liée uniquement à « l'effet découverte » voire à l'apprentissage. Ensuite les résultats demeurent très stables. En conséquence, il est donc recommandé de n'enregistrer que les résultats obtenus au deuxième test.

Niveau d'accessibilité.

L'accessibilité est entre autres, liée aux caractéristiques habituelles de la pratique de l'activité physique sur les lieux où elle se déroule : stade, salle de sport et des matériels qui s'y trouvent déjà. En fonction de ces critères nous avons établi une hiérarchie de niveaux d'accessibilité des différents tests expertisés : Tableau 6.

Ainsi, le test de Cooper présente un excellent niveau d'accessibilité, la course navette, et le Vam-éval un très bon, sensiblement meilleur que l'épreuve de course sur piste de Léger-Boucher et le TUB₂ mais nettement meilleur que le test progressif de course derrière cycliste qui nécessite une bicyclette adaptée et un cycliste habitué à pédaler à des cadences imposées.

Afin d'en améliorer le niveau d'accessibilité ainsi que la précision de ses résultats, c'est à la demande d'une part : des enseignants d'EPS et d'autre part de la Fédération Française d'Athlétisme que nous avons modifié le protocole du test de Léger et Boucher sans rien changer à son niveau de validité. Pour mieux ajuster la vitesse de course, nous avons placé les bornes-repères à 20 m les unes des autres autour d'une piste au lieu de 50 m comme prévu dans le protocole initial ; Cette distance est aussi plus facile à mesurer au moyen du double décimètre que possèdent généralement enseignants et entraîneurs et permet facilement de tracer une piste multiple de 20 m (200, 220, 240 m) sur n'importe quel terrain de football ou de rugby.

De plus, l'augmentation de la vitesse de un demi km.h⁻¹ à chaque minute à la place de 1 km.h⁻¹ toutes les deux minutes, permet non seulement d'obtenir une VAM plus précise mais aussi d'augmenter la vitesse de chaque palier de façon plus discrète et mieux adaptée aux possibilités des enfants et des adolescents.

test : 1= le plus accessible 6 = le moins accessible	Matériel nécessaire	compréhension et réalisation du protocole	Durée	nombre d'évalués à la fois	nombre d'évaluateurs
1- Cooper	1 piste + 1 chronomètre	Très facile	12 min	10 à 20 max	1
2- Course navette 20 m	1 surface plane 15 X 22 m 1 cassette enregistrée 1 magnétophone	Facile et bien expliqué	15 à 20 min	dépend de la longueur des lignes parallèles	1
3- Vam-éval	1 piste multiple de 20 m 1 cassette enregistrée 1 magnétophone + amphi	Facile et bien expliqué	10 à 20 min	possibilité d'évaluer jusqu'à 100 personnes	1 ou + suivant le nombre d'évalués
4- Course sur piste de Léger-Boucher	1 piste multiple de 20 m 1 cassette enregistrée 1 magnétophone + amphi	Facile et bien expliqué, vitesse parfois difficile à ajuster	10 à 30 min	Possibilité d'évaluer jusqu'à 50 personnes	1 ou + suivant le nombre d'évalués
5- TUB ₂	+ cardio + prélèvements	Facile et bien expliqué	10 à 30 min	Fonction du nombre de cardio et du nombre de préleveurs habilités :	Minimum 1
6- Course derrière cycliste	1 parcours plat 1 bicyclette adaptée 1 enregistrement	Facile mais évaluateur habitué à la fréquence de pédalage	10 à 25 min	Possibilité d'évaluer 4 à 6 personnes	Minimum 2

Tableau 6 : Hiérarchie argumentée du niveau d'accessibilité

3- QUE PERMET LA CONNAISSANCE DE LA VAM ?

Outre la possibilité d'évaluer l'endurance aérobie, la connaissance de la VAM s'avère aussi très utile pour au moins quatre raisons :

- elle autorise l'extrapolation de VO₂ max
- elle permet de prédire les performances potentielles de course, à la condition bien sûr de s'entraîner correctement.
- elle donne des indications sur les intensités à envisager dans les séances d'entraînement.

- elle permet aussi de mieux gérer les vitesses utiles d'entraînement.

Envisageons ces différents cas de figure :

a- VAM et évaluation de l'endurance aérobie.

Parmi les nombreuses techniques susceptibles d'évaluer l'endurance aérobie nous ne retiendrons que celles utilisant la durée limite maintenue à un pourcentage de VO_2 max ou de VAM, l'Index d'endurance aérobie de Péronnet et Thibault (1984) et l'Indice d'endurance aérobie que nous utilisons nous-mêmes (Cazorla, 1990).

□ Durée limite maintenue à un pourcentage de VAM

Une des façons d'évaluer l'endurance aérobie est de chronométrer la durée de maintien d'un pourcentage donné de la V.A.M. Nombreuses sont les études qui ont envisagé de mesurer directement cette durée au cours d'un protocole rectangulaire de course sur tapis roulant ou sur piste à des pourcentages de V.A.M. différents ou bien de la calculer (Tableau 7).

La disparité des résultats obtenus témoigne probablement du niveau différent d'endurance aérobie des populations évaluées mais peut être due aussi au choix de l'épreuve utilisée pour obtenir la vitesse aérobie maximale. Cet aspect n'est jamais discuté alors que, selon l'épreuve, cette dernière peut être sous ou surestimée entraînant de ce fait une plus ou moins longue durée limite maintenue à un pourcentage donné de la V.A.M.

Références	Course	Protocole	% de V.A.M.	E.A.(min)
Costill (1970)	Tapis roulant	Mesure	95 ± 3	30 ± 1
Costill et al. (1973)	Tapis roulant	Mesure	86.1 ± 3.9	56.3 ± 6.3
Higgs (1973)	Tapis roulant	Mesure	100	4.63
Volkov et al. (1975)	Tapis roulant	Mesure	100	5.4 ± 3.25
Briggs (1977)	Tapis roulant	Mesure	95	8.6 ± 1.4
Reybrouck et al. (1986)	Tapis roulant	Mesure	91.3	22.9 ± 20.9
Péronnet et al. (1987)	Piste	Calcul	100	7
Montmayeur et Villaret (1989)	Piste	Calcul	100	4.5
Lacour et al. (1990)	Piste	V 3000m	100	8.7
Padilla et al. (1992)	Piste	Calcul	100 Homme et Femme	8.4 + 2.1 7 ± 2.2
Ramsbottom (1992)	Piste	Mesure	Homme : 90 Femme : 82	18.7 ± 1.27 21.8 ± 1.98
Pepper et al. (1992)	Tapis roulant	Mesure	98 111	7.2 ± 2.8 3.4 ± 1.4
Billat et al.(1994-1995)	Tapis roulant	Mesure	90 100 100 100	17.6 ± 4.5 6.7 ± 1.88 5.5 ± 1.5 2.9 ± 0.7

Tableau 7 : Synthèse des résultats des principales études portant la durée limite de maintien d'un pourcentage de la vitesse aérobie maximale. On remarquera la disparité de ces durées.

Pour notre part, avec une population constituée de 319 jeunes garçons et filles âgés de 8 à 15 ans et en utilisant 100 % de leur V.A.M. obtenue au test VAMEVAL nous avons mesuré sur piste une durée limite moyenne de 5.48 ± 1.56 min (données non publiées).

A des fins de comparaison il est donc indispensable de mieux standardiser l'épreuve amenant les sujets à leur V.A.M. (nous suggérons les tests VAMEVAL ou TUB II) et de conserver ensuite toujours ces mêmes épreuves et les mêmes pourcentages de la V.A.M. obtenue dans un délai maximum d'une semaine avant le test d'endurance.

Bien que ces modèles constituent des points de repère intéressants pour juger de l'endurance aérobie d'un sujet par rapport à une norme, leur aspect le plus contestable est de ne pas considérer l'endurance aérobie comme une capacité physiologique spécifique susceptible d'être très fortement améliorée par l'entraînement et donc très différente d'un sujet à l'autre. En outre dans le cas du suivi des effets de l'entraînement sur l'endurance aérobie, plutôt qu'une norme, ce sont aussi les résultats du sportif comparé à lui-même qu'il convient de prendre en compte pour en analyser les différences. En effet après six semaines d'entraînement, la durée limite de course à 80 % de VO_{2max} peut être améliorée de plus de 250% chez des sujets qui présentaient une activité normale avant cette période d'entraînement.

□ L'Index d'Endurance : I.E. (Péronnet et Thibault, 1984 ; 1987).

Partant de ces critiques, Péronnet et Thibault (1984,1987) ont développé un nouveau concept dans lequel l'endurance est considérée comme une entité propre à chaque individu. L'originalité de leur modèle est d'exprimer la durée limite du maintien de course à des pourcentages différents de la P.A.M.(ou de la V.A.M.) en abscisse sur une échelle logarithmique. Dans ces conditions la relation % de V.A.M.- durée limite qui normalement est curvilinéaire devient totalement linéaire (Figure 19).

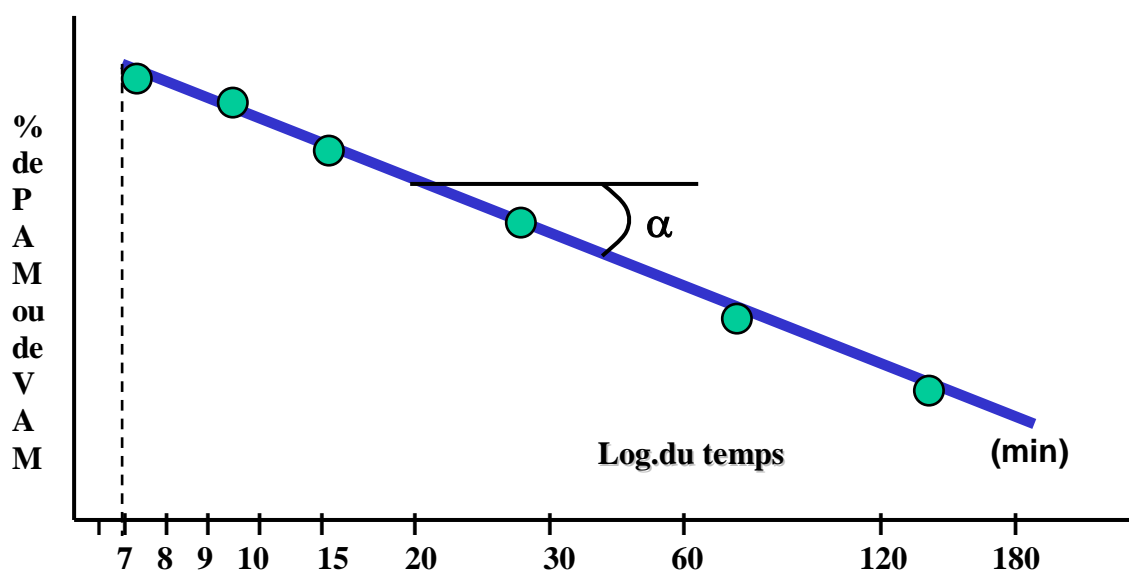


Figure 19 : Le % de PAM ou de VAM qui est maintenu par un coureur diminue avec le temps de course de façon linéaire si le temps est porté en abscisse sur une échelle logarithmique

L'endurance peut alors être calculée à partir de la pente de la droite (angle α de la figure 19) de décroissance de la relation ainsi obtenue, selon l'équation proposée par les auteurs :

$$I.E.= (100 - \% V.A.M.) / (\ln 7 - \ln t)$$

Dans laquelle $\ln 7$ est le logarithme naturel de 7min, durée limite théorique de maintien de la V.A.M. et $\ln t$ est celui d'une performance quelconque de longue durée exprimée en minute.

Prenons l'exemple de deux coureurs possédant la même VAM : 21 km/h mais dont l'un court le marathon en 2h 25min (ou 145min) et l'autre en 2h 35min (ou 155min) ce qui représente des vitesses moyennes de : $42195 \text{ m} / 145 = 291 \text{ m/min}$ (ou 17.46 km/h) et de 272.2 m/min (ou 16.33 km/h). Ces vitesses représentent respectivement elles-mêmes 83.1% et 77.8% de leur V.A.M.. Leur I.E. respectif est donc :

$$(100 - 83.1) / (1.946 - 4.977) = - 5.58 \text{ pour le premier}$$

$$\text{et } (100 - 77.8) / (1.946 - 5.040) = - 7.17 \text{ pour le second}$$

Ainsi, plus la pente décroissante (exprimée en conséquence par un chiffre négatif) est faible, meilleure est l'endurance. De cette façon l'endurance est découplée de la P.A.M. de la V.A.M. ou de VO2 max et constitue une capacité en elle-même dont Péronnet et al.(1991) proposent une échelle d'appréciation, elle-même issue de l'évaluation de populations aux niveaux d'endurance très hétérogènes (Tableau 8)

	Endurance très élevée	Endurance élevée	Endurance moyenne	Endurance faible	Endurance très faible
Indice d'endurance	- 4	- 6	- 8	- 10	- 12

Tableau 8 : Echelle d'appréciation du niveau d'endurance à partir du calcul de l'index d'endurance (IE) de Péronnet et Thibault (1984,1987). D'après Péronnet et al. (1991).

Même si ce modèle permet de façon concrète de calculer l'endurance, le choix d'une durée de maintien de la VAM pendant 7min constitue son maillon faible. Sept minute est une valeur moyenne correspondant au maintien à la VAM obtenue au test de Léger et Boucher. Il suffit qu'une autre valeur de VAM même très discrètement inférieure ou supérieure soit obtenue à un autre test, ou encore que deux coureurs maintiennent respectivement une durée soit sensiblement supérieure soit inférieure à 7min pour que leur pente individuelle de décroissance soit modifiée et donc que soit modifié leur index d'endurance.

□ L'Indice d'endurance aérobie : I.EA

A des fins pédagogiques, pour notre part, nous utilisons un indice au calcul plus accessible aux jeunes scolaires. Pour obtenir cet indice nous proposons d'abord de mesurer la VAM et ensuite d'enregistrer une performance de longue durée comme la plus grande distance courue pendant 12,15,20 ou 30 min. Nous calculons alors le rapport : (vitesse moyenne tenue pendant la durée choisie / VAM) . 100 ce qui constitue L'I.EA de chaque jeune évalué. Plus le pourcentage obtenu tend vers 100 meilleure et l'endurance spécifique du sujet. En

supposant qu'au delà d'une période de 10 semaines d'entraînement la V.A.M. demeure stable, il est ainsi possible d'objectiver l'amélioration subséquente de la seule endurance aérobie pour apprécier ses effets sur la performance.

Prenons l'exemple d'un jeune dont la V.A.M. a été mesurée à 15 km.h⁻¹ et qui réussit à parcourir 2750m au test de 12min de Cooper. Son I.E.A. est :

$$2750\text{m} / 12\text{min} = 229.17\text{m}\cdot\text{min}^{-1} \text{ ou } (13.75 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \cdot 100) / 15 = 91.67\%$$

$$\text{Ou encore : } 2750\text{m} \cdot 100 / 3000\text{m (distance théorique qu'il aurait parcourue en 12min à sa V.A.M.)} = 91.67\%$$

b- VAM et extrapolation de VO₂ max

Nombreux sont les auteurs qui ont proposé des équations de prédictions de VO₂ max (ml·min⁻¹·kg⁻¹) à partir de la connaissance de la VAM.

Celle de Léger et Mercier (1983) qui résume l'ensemble des équations publiées pour calculer une équation moyenne VO₂ max (ml·min⁻¹·kg⁻¹) = 3,5 X VAM (km.h⁻¹) s'avère la plus simple. Les résultats admettent cependant une marge d'erreur liée à l'économie de course, dont nous rappelons que la différence interindividuelle peut s'inscrire dans une limite de ± 5 %.

c- Performances et % de vam sollicités

Plusieurs études : Thibaut et Mercier, 1981 ; Léger et al., 1985 ; Villaret, 1988 ; Montmayeur et Villaret, 1990 ; ont permis de préciser à quels pourcentages de VAM se couraient les différentes distances de compétitions. Ces indications constituent d'excellentes orientations pour l'entraînement spécifique en fonction des performances visées. (Tableau 7.9).

Distances de compétition	% VAM Course sur piste	Corrélation VAM – Perf.
400 m	145 à 155	
800 m	120 à 125	r = . 72 (n = 40)
1000 m	105 à 115	r = . 92 (n = 105)
1500 m	101 à 111	r = . 92 (n = 105)
2000 m	98 à 102	r = . 95 (n = 71)
3000 m	95 à 100	r = . 98 (n = 69)
5000 m	90 à 95	r = . 98 (n = 69)
10 000 m	85 à 90	r = . 88 (n = 108)
20 000 m	80 à 88	r = . 88 (n = 108)
marathon	75 à 84	r = . 85 (n = 108)

Tableau 9 : Pourcentages de la VAM susceptibles d'être maintenus pendant les différentes distances de compétition et corrélation entre VAM et vitesses auxquelles ont été réalisées ces performances

L'étude de ce tableau met en évidence une corrélation qui augmente jusqu'à la distance de 3 000 m courue entre 95 et 100 % de VAM et qui diminue ensuite. Ceci peut traduire respectivement la complémentarité plus ou moins importante du métabolisme anaérobie entre le 800 et le 2000 m et celle de l'endurance aérobie à mesure que la distance augmente au-delà de 3000 m. D'une façon générale, cette dernière distance semble la plus proche de la VAM chez les coureurs de demi-fond bien entraînés et peut éventuellement servir de critère de VAM uniquement pour cette population. Pour les autres sportifs, la VAM peut être atteinte entre 2000 et 3000 m ce qui ne confère pas une précision suffisante aux résultats souvent aléatoires ainsi obtenus.

2-4 VAM et prédiction de performances

Outre l'extrapolation de VO_{2max} , la connaissance de la VAM peut aussi permettre de « prédire » avec une assez bonne précision les performances susceptibles d'être atteintes en course si, bien sûr, le sportif s'entraîne correctement pour développer spécifiquement les capacités physiologiques et techniques requises par la performance visée et si son efficacité de course n'est pas trop défaillante.

A partir du tableau 10, si le sportif est âgé de 18 ans ou plus et s'il connaît sa VAM ou son VO_{2max} , il peut prédire les performances potentielles depuis le 800 m jusqu'au marathon.

Par exemple, si sa VAM est 18 km/h, ce qui correspond à un VO_{2max} extrapolé ou mesuré en laboratoire de $63 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, à la condition de s'entraîner spécifiquement, il peut espérer atteindre (avec une marge d'erreur possible de 5 à 7% en plus ou en moins) les performances suivantes : 2 min 17 s au 800 m ; 2 min 59 s au kilomètre ; 4 min 50 s au 1 500 m ; 6 min 42 s au 2 000 m ; 10 min 38 s au 3 km ; 18 min 30 s au 5 km ; 39 min 18 s au 10 km ; 1 h 47 s au 15 km ; 1 h 22 min 46 s au 20 km ; 1 h 26 min 50 s au 21 km et 3 h 8 min 6 s au marathon.

Si le sportif n'atteint pas ces performances c'est probablement que sa capacité anaérobie lactique (ou capacité de produire de l'acide lactique et de supporter une forte acidose musculaire) n'est pas suffisamment développée pour les distances courtes inférieures au 3000 m, ou bien que son endurance aérobie n'a pas été assez bien développée pour maintenir une vitesse élevée sur des distances longues, ou/et qu'il présente une médiocre économie de course. Ainsi, la prédiction de la performance à partir de la connaissance de la VAM peut renforcer la motivation pour atteindre ou dépasser la performance cible et indirectement mettre en évidence certaines carences au niveau des différents facteurs dont dépend la performance.

Il ne reste plus au sportif qu'à s'entraîner rationnellement ce que permettent non seulement l'ensemble des résultats obtenus aux différentes épreuves proposées dans ce chapitre, mais aussi la connaissance de la VAM, comme nous l'étudierons dans un prochain chapitre.

VAM km · h ⁻¹	VO ₂ max	PERFORMANCES POTENTIELLES (h : min : s)										
		selon différentes distances de course (m)										
		800	1000	1500	2000	3000	5000	10000	15000	20000	30000	42195
14	49.0	2:59	3:56	6:30	9:05	14:28	25:20	56:15	1:27:23	1:59:22	3:15:43	4:54:07
15	52.5	2:46	3:38	5:59	8:20	13:16	23:11	50:47	1:18:46	1:47:29	2:53:20	4:17:48
16	56.0	2:35	3:24	5:32	7:43	12:15	21:23	46:17	1:11:42	1:37:45	2:35:33	3:49:28
17	59.5	2:26	3:11	5:09	7:10	11:23	19:50	42:30	1:05:47	1:29:38	2:21:05	3:26:44
18	63.0	2:17	2:59	4:50	6:42	12:38	18:30	39:18	1:00:47	1:22:46	2:09:06	3:08:06
19	66.5	2:10	2:49	4:32	6:17	9:58	17:20	36:33	56:29	1:16:52	1:59:57	2:52:34
20	70.0	2:03	2:40	4:17	5:56	9:23	16:18	34:10	52:45	1:11:45	1:50:18	2:39:23
21	73.5	1:57	2:32	4:03	5:36	8:52	15:23	32:04	49:29	1:07:17	1:42:49	2:28:05
22	77.0	1:51	2:25	3:50	5:19	8:24	14:34	30:12	46:36	1:03:20	1:36:17	2:18:16
23	80.5	1:46	2:18	3:39	5:07	7:59	13:50	28:33	44:01	59:30	1:30:32	2:09:41
24	84.0	1:42	2:12	3:29	4:49	7:36	13:10	27:04	41:43	56:41	1:25:26	2:02:06
25	87.5	1:37	2:06	3:20	4:36	7:15	12:34	25:44	39:39	53:51	1:20:53	1:55:21

Tableau 10 : A partir de la connaissance de la VAM (km/h) il est possible d'extrapoler VO_{2max} (ml.min-1.kg-1) et de prédire les performances de course susceptibles d'être atteintes (d'après Mercier et Léger, 1982)

Renseignements :

Les enregistrements de l'ensemble des tests validés pour obtenir la VAM ainsi que les différents logiciels en permettant l'exploitation pour l'orientation, le contrôle et le suivi de l'entraînement sont exclusivement distribués ou téléchargeables en France par:

*L'AREAPS : 3, chemin Buisson du Luc; 33 610 Cestas
Téléphones 00 33 5 56 78 15 84 ou 00 33 6 12 64 83 09
E-mail : areaps33@gmail.com*

BIBLIOGRAPHIE

- Billat V., Pinoteau J., Petit B. and al.** Time to exhaustion at VO_2 max and lactate steady-state velocity in sub-elite long-distance runners. *Arch. Int. Physiol. Biochim.*, 120 : 215-9, 1994.
- Billat V., Pinoteau J., Petit B. and al.** Exercise induced hypoxemia and time to exhaustion at 90,100 and 105 % of the maximal aerobic speed in long-distance elite runners. *Can J Appl Physiol* : 20 : 102-111, 1995.
- Billat V., Koralsztein J.P.** Significance of the velocity at VO_2 max and time to exhaustion at this velocity. *Sports Med.*, 22 (2) : 90-108, 1996.
- Briggs CA.** Maximum aerobic power and endurance as predictors of middle distance running success. *Aust J Sport Med*, 9 : 28-31, 1977.
- Brue F. et Montmayer A.** Les tests de terrain d'aptitude aérobie. Compte rendu du Colloque Médico-Technique National, Fédération Française d'Athlétisme : 200-205. Mulhouse, oct. 1988.
- Cazorla G.** Test de terrain pour évaluer la capacité aérobie et la vitesse aérobie maximale. Dans : « Actes du colloque international de la Guadeloupe ». Eds : ACTSCHNG & AREAPS : 151-173, 23 nov. 1990.
- Cazorla G. et Léger L.** Comment évaluer et développer vos capacités aérobie. Epreuves de course navette et épreuve Vam-éval. Eds AREAPS : 123, 1993.
- Cooper K.H.** A mean of assessing maximal oxygen intake : correlation between field and treadmill testing. *J. Am. Heart Ass.* 203 : 135-138, 1968.
- Costill DL.** Metabolic responses during distance running. *J Appl Physiol* 28 : :248-252, 1970.
- Higgs SL.** Maximal oxygen intake and maximal work performance of active college women. *Res Q*, 44 : 125-131, 1973.
- Hourcade J.C.** Etude comparative de deux tests de terrain : le test de l'Université Victor Segalen Bordeaux 2 (TUB₂) et le VAMEVAL. Mémoire pour le diplôme de Maîtrise en STAPS. *Faculté des Sciences du Sport et de l'Education Physique de Bordeaux*, 1997.
- Lacour J.R.** Le coût énergétique de la course. Influence de la morphologie et de la vitesse. Compte rendu du Colloque Médico-Technique National. Fédération Française d'Athlétisme. Mérignac, oct. 1990.
- Lacour J.R., Montmayer A., Dormois D. and al.** Validation of the UMTT test in a group of elite middle-distance runners. *Science et Motricité*, 7 : 3-8, 1989.
- Léger L. and Boucher R.** - An indirect continuous running multistage field test : The « Université de Montréal » Track test. *Can. J. Appl. Spt. Sci.* : 5, 77-84, 1980.
- Léger L.A. and Lambert, J.** - A maximal multistage 20 m shuttle run test to predict VO_2 max. *Eur. J. Appl. Physiol.* 49 : 1-12, 1982.
- Léger L.A. et Mercier D.** Coût énergétique de la course sur tapis roulant et sur piste. *Motricité Humaine*, 2 : 66-69, 1983.
- Léger L., Mercier D. and Gauvin L.** The relationship between % VO_2 max and running performance time. In Sport and Elite Performers Proceeding of 1984. Olympic Scientific Congress, Champaign : Human Kinetics Publ., 1985.
- Léger L., Cloutier J., Rowan, C.** - Test progressif de course navette de 20 m avec paliers de 1 min. *Université de Montréal*, 1985.
- Mercier D. et Léger L.** L'évaluation de la puissance aérobie maximale du coureur. *Track and field Journ.* 20 : 20-23, February, 1982a.
- Mercier D. et Léger L.** Détermination et contrôle de l'intensité de l'entraînement du coureur. *Track and field Journ.* 20 : 24-27, February, 1982b.
- Mercier D., Léger L.** Prediction of the running performance with the maximal aerobic power. *STAPS*, 14 : 5-28, 1986.
- Montmayer A. et Villaret M.** Etude de la vitesse maximale aérobie derrière cycliste : valeur prédictive sur la performance en course à pied.
- Padilla S., Bourdin M., Barthélémy JC. et Lacour JR.** Physiological correlalates of middle-distance running performance. *Eur J Appl Physiol*, 62 : 561-566, 1992.

Pepper ML., Housh TJ et Johnson GO. The accuracy of the critical velocity test for predicting time to exhaustion during treadmill running. *Int J Sports Med*, 13 :121-124, 1992.

Péronnet F. et Thibault G. Analyse physiologique de la performance en course à pied : révision du modèle hyperbolique. *J. Physiol (Paris)*, 82 ;56-60, 1987.

Péronnet F. La physiologie du marathonien. Dans : *La Recherche* (9), 201 : 920-930, 1988.

Péronnet F., Thibault G., Ledoux M. et Brisson G.R. Le marathon 2^{ème} éditions. *Décarie-Vigot Eds.*, 1991.

Pugh L.G.C.E. Oxygen intake in track and treadmill running with observations on the effect of air resistance. *J. Physiol. (London)*, 207 : 823-835, 1970.

Ramsbottom R., Williams C., Kerwin DG. et Nute ML. Physiological and metabolic responses of men and women to 5-km treadmill time trial. *J Sports Sci*, 10 : 119-129, 1992.

Reybrouck T., Ghesquiere J., Weymans M. et al. Ventilatory threshold measurement to evaluate maximal endurance performance. *Int J Sports Med*, 7 :26-29, 1986.

Volkov NL., Shirkovets EA. et Borilkevich VE. Assessment of aerobic and anaerobic capacity of athletes in treadmill running tests. *Eur J Appl Physiol*, 34 : 121-130, 1975.