

La notion de transition aérobie - anaérobie

Sources : *Biologie de l'exercice musculaire*. J.R. Lacour. Masson, Paris, 1992.
Au nom du seuil, je vous arrête. Denis Riché, in Sport et Vie n° 44, 1997.
Physiologie et méthodologie de l'entraînement. Véronique Billat. De Boeck Université, Paris, Bruxelles, 1998.
Comment faire parler l'acide lactique. Antoine Vayer, in Sport et Vie n° 61, 2000.
Physiologie de l'exercice musculaire. G.Millet, S.Perrey, Ellipses, Paris, 2005.
Physiologie et méthodologie de l'entraînement. V.Billat, De Boeck, 2012.
A quoi servent les seuils ?, Mathieu Lambert, <https://www.sporttesting.fr/post/a-quoi-servent-les-seuils>
[ChronosWatts.com](https://www.chronoswatts.com)

I. Définition

La consommation maximale d'oxygène ne peut être maintenue qu'un temps limité, de 4 à 10 minutes selon l'aptitude, et en moyenne autour de 6 min. C'est dans l'accumulation de lactate qu'il faut voir les raisons de cette limitation dans le temps (cette accumulation s'accompagne d'une baisse du pH sanguin et musculaire par une augmentation de proton H⁺, ce qui perturbe les contractions musculaires). En effet, l'intensité d'exercice correspondant à VO₂max est une intensité où l'on observe une augmentation continue de la production de lactate. Cette augmentation va rapidement provoquer une fatigue musculaire rendant la poursuite de l'exercice impossible au même niveau d'intensité.

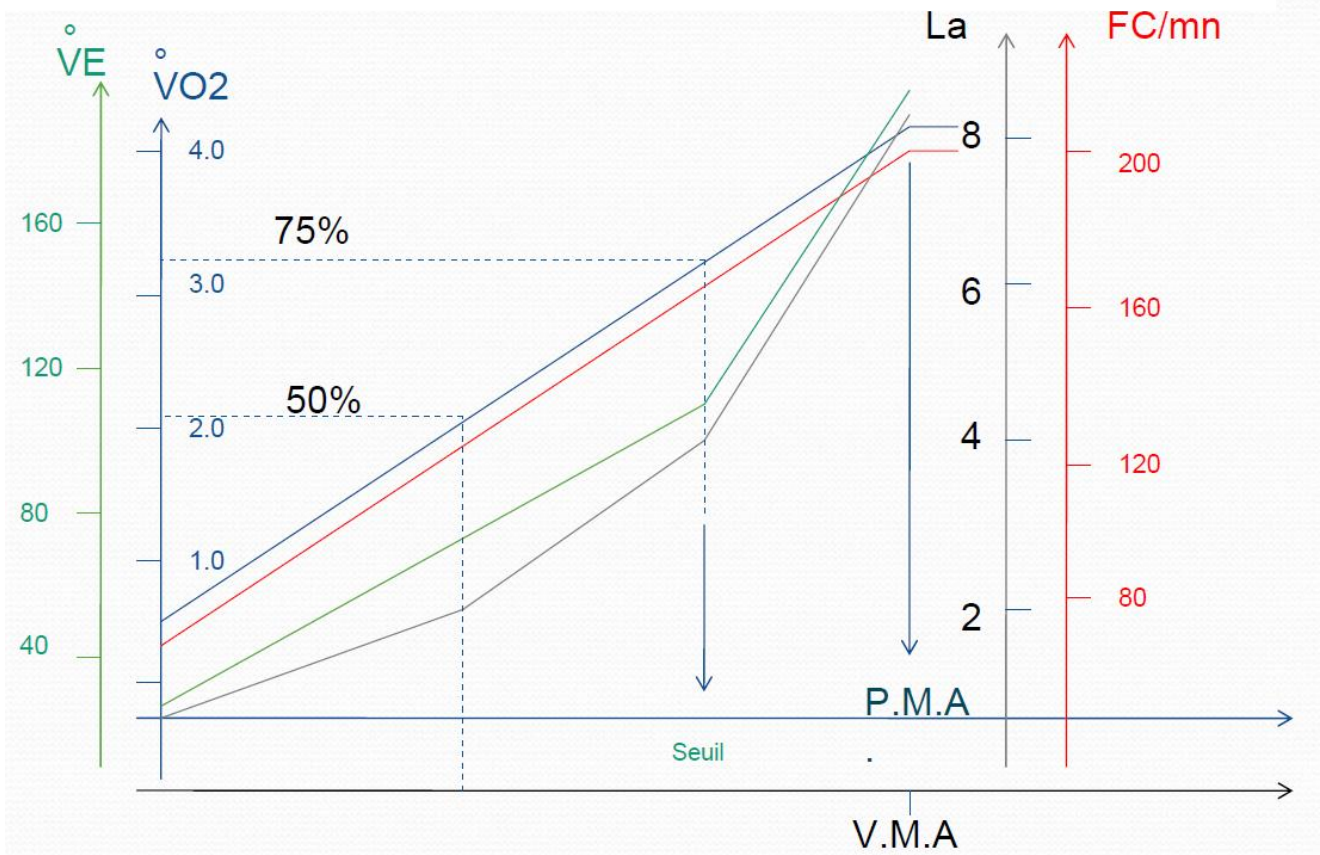
La question qui se pose alors est de repérer l'intensité de l'effort au-delà de laquelle l'athlète s'épuise rapidement par diminution du pH musculaire. La notion de transition aérobie – anaérobie a été proposée pour rendre intelligible ce niveau d'intensité : **il s'agit de l'intensité de travail à partir de laquelle la contribution du métabolisme anaérobie à la fourniture d'énergie augmente rapidement, avec une augmentation très marquée des concentrations sanguines en lactate**. Deux points d'inflexion de l'évolution de la lactatémie en fonction de la puissance de l'exercice délimitent cette zone :

→ **le seuil aérobie est un seuil d'apparition des lactates** (aussi appelé seuil lactique 1 ou seuil ventilatoire 1) : il correspondrait à une lactatémie égale à 2 mmol.l⁻¹ (moyenne statistique). En réalité avant ce seuil il y a déjà production d'acide lactique, mais à des niveaux très faibles (le seuil aérobie marque une première légère rupture). C'est avant ce seuil que le Fatmax (taux d'oxydation des graisses) est le plus important.

→ **le seuil anaérobie est un seuil d'accumulation des lactates** (aussi appelé seuil lactique 2 ou seuil ventilatoire 2) : il correspondrait à une lactatémie égale à 4 mmol.l⁻¹ (d'après Keul et al., 1978 ; Kinderman et al., 1979). Notons que le seuil lactique sanguin n'est que le reflet du seuil lactique musculaire.

Passé le seuil anaérobie (seuil lactique 2, seuil ventilatoire 2), l'équilibre est rompu entre la vitesse de production et la vitesse d'élimination des lactates dans l'organisme. Dès lors, le sportif ne pourra pas maintenir sa puissance d'exercice au même niveau très longtemps (il est « dans le rouge »). Notons que la valeur de 4 mmol.l⁻¹ correspond à une moyenne statistique et ne tient pas compte des différences interindividuelles, elle est donc largement remise en question aujourd'hui.

Mais si l'intensité de l'exercice se situe en-deçà du seuil anaérobie, l'effort pourra être maintenu à la même intensité beaucoup plus longtemps. D'autres paramètres interviendront alors pour limiter le maintien de la puissance d'exercice sur la durée (les réserves en glycogène musculaire ou les possibilités de thermorégulation).



Zone 1 : sous le seuil aérobie	Seuil aérobie	Zone 2 : zone de transition aérobie-anaérobie	Seuil anaérobie	Zone 3 : au-dessus du seuil anaérobie
< PMA (26 – 30 km/h)	Intensité < PMA (28 – 32 km/h)	< PMA	< PMA	Proche ou = PMA
< 75 % FC max.*	75 – 85 % FC max.*	85 – 92 % FC max.*	92 - 96 % FC max.*	96 – 100 % FC max.*
<u>Durée</u> : plusieurs heures possibles	<u>Durée</u> : plusieurs heures possibles	<u>Durée</u> : 2-3 heures max.	<u>Durée</u> : max. vers 1 heure	<u>Durée</u> : à PMA seulement 6-10 min.
Lipides / Glucides	Lipides / Glucides	Lipides / Glucides	Glucides	Glucides
Effort perçu --	Effort perçu -	Effort perçu =	Effort perçu +	Effort perçu ++
FFC I1	FFC I2	FFC I3	FFC I4	FFC I5

*ces pourcentages dépendent du niveau d'entraînement des sujets

II. Valeurs

Sédentaire : seuil 2 vers 60% de VO₂max.

Donc si VO₂max = 44 ml.min⁻¹.kg⁻¹, le seuil anaérobie correspond à une consommation d'oxygène de 26 ml.min.kg⁻¹.

Donc si PMA = 200 Watts seuil anaérobie = 120 Watts.

Fréquence cardiaque au seuil = environ 150 bpm (chez un sujet de 20 ans).

Vitesse de course au seuil anaérobie = environ 9/10 km/h.

Coureur de fond de niveau régional : seuil 2 vers 75% de $VO_2\text{max}$

Donc si $VO_2\text{max} = 70 \text{ ml.min.kg}^{-1}$, le seuil anaérobie correspond à une consommation d'oxygène de $52.5 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ /

Donc si PMA = 380 Watts seuil anaérobie = 285 Watts.

Fréquence cardiaque au seuil = environ 175 bpm.

Vitesse de course au seuil anaérobie = environ 17-18 km/h.

Sportif de haut niveau dans une discipline d'endurance : seuil 2 vers 85% de $VO_2\text{max}$.

Donc si $VO_2\text{max} = 86 \text{ ml.min.kg}^{-1}$, le seuil anaérobie correspond à une consommation d'oxygène de $77 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$.

Donc si PMA = 480 Watts, seuil anaérobie = 408 Watts.

Fréquence cardiaque au seuil = environ 185 bpm.

Vitesse de course au seuil anaérobie = environ 20 km/h.

Exemples avec 3 coureurs cyclistes amateurs : un coureur de niveau national et deux coureurs de niveau régional.

B.L. (26ans, 55 kg) : $VO_2\text{max} = 4,51 \text{ l.min}^{-1} = 81 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

PMA = 456 W,

FC max = 202 rpm,

Seuil anaérobie = $3,8 \text{ l.min}^{-1} = 69 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

Puissance au seuil anaérobie = 396 W,

FC au seuil anaérobie = 189 rpm,

Seuil anaérobie = 84% de $VO_2\text{max}$.

S.G. (22ans, 67 kg) : $VO_2\text{max} = 4,32 \text{ l.min}^{-1} = 69 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

PMA = 453 W,

FC max = 184 rpm,

Seuil anaérobie = $3,5 \text{ l.min}^{-1} = 52 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

Puissance au seuil anaérobie = 326 W,

FC au seuil anaérobie = 162 rpm,

Seuil anaérobie = 81% de $VO_2\text{max}$.

S.V. (23 ans, 61 kg) : $VO_2\text{max} = 4,2 \text{ l.min}^{-1} = 68,5 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

PMA = 398 W,

FC max = 189 rpm,

Seuil anaérobie = $3,4 \text{ l.min}^{-1} = 55,7 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$,

Puissance au seuil anaérobie = 290 W,

FC au seuil anaérobie = 171 rpm,

Seuil anaérobie = 81% de $VO_2\text{max}$.

Exemple de Chris Froom (67kg) : $VO_2\text{max} = 5.7 \text{ l.min}^{-1} = 84.6 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

PMA = 525 W

PMA relative = 7.8 W.kg^{-1}

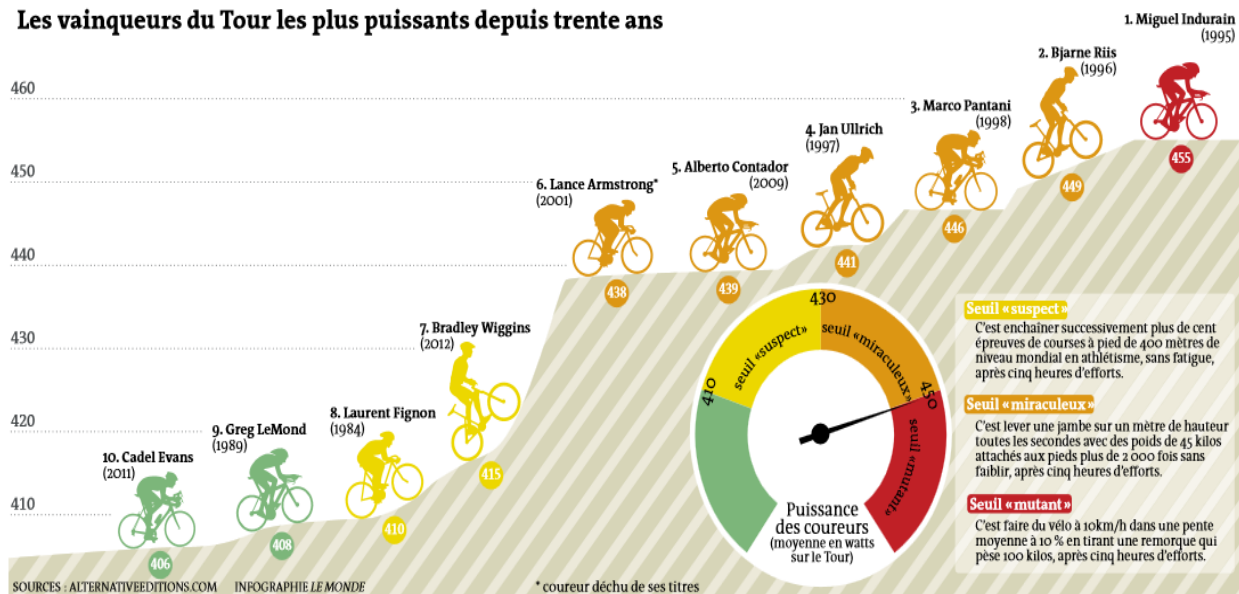
Puissance au seuil = 426 W

Puissance au seuil relative = 6.37 W.kg^{-1}

Seuil anaérobie = 81% de $VO_2\text{max}$.

Selon Peter Keen, entraîneur de Chris Boardman, celui-ci aurait utilisé plus de 92% de $VO_2\text{max}$ lors de son record de l'heure de 56,375 km (soit une FTP à 92% de $VO_2\text{max}$).

Les vainqueurs du Tour les plus puissants depuis trente ans



III. Zone de transition et performance

Les étroites corrélations qui unissent l'intensité de l'exercice au niveau du seuil 2 et la performance à l'exercice de moyenne et de longue durée confèrent à cette notion un intérêt de premier ordre. En effet, plus la zone de transition est élevée, et plus la performance est bonne. **Les corrélations obtenues avec la performance sont plus étroites que celles que l'on obtient à partir de VO₂max dès que la durée de l'effort dépasse 20-30 min.**

Laursen et al. (2003) ont montré que pour un même VO₂max, la vitesse sur un contre-la-montre de 40 km est plus rapide chez des sujets possédant un S2 plus élevé.

La notion de transition aérobie – anaérobie conditionne en grande partie **l'endurance aérobie**, c'est à dire la capacité d'un organisme à maintenir un pourcentage élevé de sa consommation maximale d'oxygène le plus longtemps possible. Un écart de quelques % entre deux sportifs constitue pour celui qui dispose du seuil 2 le plus élevé un atout considérable.

IV. Influences de l'entraînement

Le seuil anaérobie évolue de manière importante avec l'entraînement : chez l'adulte, c'est un paramètre plus sensible aux influences de l'entraînement que ne l'est la consommation maximale d'oxygène. **Les améliorations obtenues sont en effet de 40% en moyenne et plus (contre environ 15-20% pour VO₂max).**

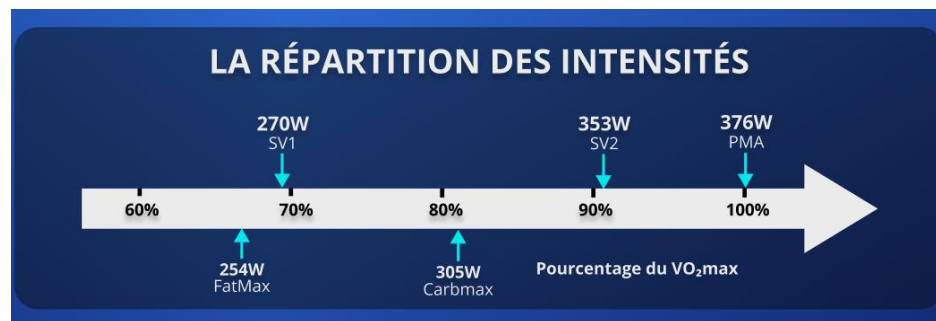
Il est possible d'assister à une amélioration de la performance en endurance sans augmentation de VO₂max à condition que le seuil anaérobie s'élève. Lorsqu'un entraînement détermine un effet à la fois sur VO₂max et sur la zone de transition, c'est sur cette dernière que l'effet le plus marqué sera le plus souvent observé.

L'intensité de l'entraînement doit être au moins égale à celle du seuil 2 pour observer une amélioration du potentiel aérobie (l'entraînement au niveau du seuil anaérobie va surtout améliorer la zone de transition, alors que l'entraînement au-dessus de ce seuil va surtout améliorer la consommation maximale d'oxygène). Pour Kinderman (1979), un entraînement au niveau du seuil aérobie entretient la condition physique des sujets, alors qu'un travail au niveau du seuil anaérobie permet l'augmentation de la capacité physique de l'individu. La connaissance de la fréquence cardiaque ou mieux de la puissance au seuil

anaérobie est d'une grande importance car elle permet d'ajuster l'entraînement et donc de viser des adaptations physiologiques particulières.

La connaissance ce du second seuil (S2) est donc un paramètre complémentaire, voire plus utile que VO₂max pour programmer et individualiser l'entraînement en cyclisme sur route. L'amélioration de ce seuil doit être une priorité (puissance au S2), sans doute davantage que l'amélioration de la consommation maximale d'oxygène (PMA). Surtout si le sportif possède un VO₂max élevé (> 70 ml.min-1.kg-1) et un S2 modeste (< 70% de PMA).

Profil 1 : axer l'entraînement sur VO₂Max



Profil 2 : axer l'entraînement sur le second seuil (S2)



D'après Mathieu Lambert, <https://www.sporttesting.fr/post/a-quoi-servent-les-seuils>

Modalités d'entraînement pour améliorer le second seuil (S2) :

Code FFC	Intensité / seuils	Qualité dév.	Puissance / PMA	FC indicative	FC / seuils	Type de travail	Temps de travail	Nombre de répétitions	Nombre de séries
14*	Travail au seuil anaérobie	Endurance critique haute	< PMA	92 - 96 % FC max.	FC proche du seuil anaérobie	Fractionné ou continu	5 à 30 min. (fractionné) ou 15 min. à 1 heure (continu)	2 (30 min.) à 8 (5 min.)	1

*d'après l'échelle ESIE de Grappe et al. (1999)

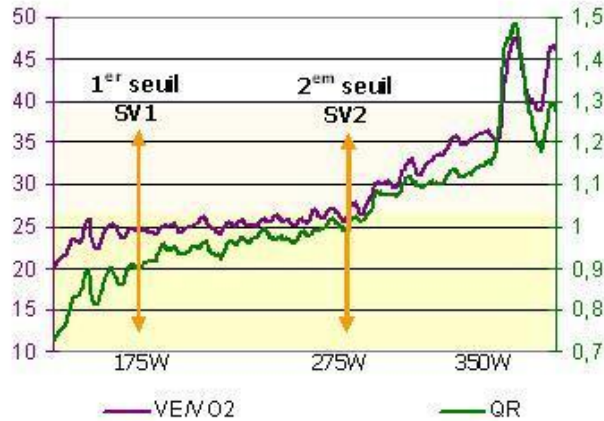
VII. Le quotient respiratoire

Le quotient respiratoire est le rapport CO₂ expiré sur O₂ inspiré (VCO₂ / VO₂). Au repos, les valeurs de QR sont entre 0.75 et 0.85.

En deçà du seuil anaérobie, QR est proche de l'unité. **Lorsque la contribution des processus anaérobies à la fourniture d'énergie augmente rapidement, QR augmente et dépasse l'unité car la production de CO₂ augmente (QR >1).** L'augmentation du volume de CO₂ produit par

l'organisme est directement liée à la formation des ions bicarbonates (HCO_3^-) destinés à tamponner les ions H^+ .

L'évolution de QR au cours d'un test triangulaire (incrémenté) permet de donner la valeur d'un seuil qualifié de ventilatoire SV2 (ou seuil d'inadaptation ventilatoire), qui se situe très proche du seuil lactique (méthode assez fiable).



Evolution du QR selon l'intensité de l'exercice

QR entre 0.7 et 0.8 au repos : lipides essentiellement oxydés.

QR < 1 à l'exercice, triglycérides (lipides) utilisés.

QR = 1 glucose utilisé.

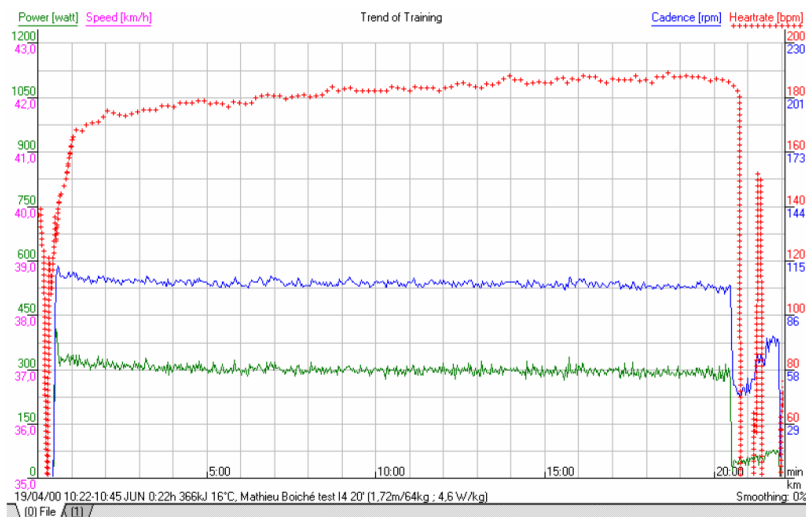
QR > 1 glycolyse anaérobie rejette + de CO_2 que d' O_2 consommé = SV2 (seuil ventilatoire 2).

QR >= 1,1 épuisement rapide.

V. Tests

Test rectangulaire de terrain : 20 minutes en continu avec enregistrement de la puissance, de la fréquence cardiaque et de la cadence. Réaliser la meilleure performance possible sur une durée de 20 minutes après un échauffement de 15 minutes. La puissance moyenne correspond à la puissance au seuil anaérobie. Avec un cardiofréquencemètre il est également possible d'identifier sa fréquence cardiaque (FC) au S2.

Exemple d'un test maximal sur 20 min



D'après F.Grappe, 2006

Test triangulaire (incrémenté) en laboratoire avec prise de lactate et/ou mesure de la ventilation : la puissance de l'exercice augmente par paliers successifs (en général 1 minute) pour observer le moment où la lactatémie augmente de façon exponentielle par rapport à l'intensité de l'effort (point d'inflexion). Cette observation est plus fiable que celle qui consiste à identifier le seuil à 4mmol/L (car tous les athlètes n'ont pas un seuil lactique à 4mmol/L).

Il est également possible de surveiller la ventilation, et notamment l'évolution du Quotient Respiratoire (QR) : lorsqu'il dépasse 1 l'intervention de la glycolyse anaérobie devient prioritaire.

VI. Signification physiologique de la zone de transition aérobie – anaérobie

A propos de la zone transitionnelle aérobie – anaérobie, H.Monod et R.Flandrois soulignent que « *si ce fait n'est pas contesté, sa signification physiologique reste encore à démontrer* » (Physiologie du sport. Paris, Masson, 1997). Quant à Michel Rieu, il souligne que « *trop d'incertitudes subsistent encore pour pouvoir accorder au concept de « seuil aérobie – anaérobie » une signification physiologique certaine* » (1986).

Sur les mécanismes explicatifs du seuil anaérobie, voir les hypothèses rassemblées par G.Millet et S.Perrey (*Physiologie de l'exercice musculaire*, Ellipses, Paris, 2005).

VII. La FTP (Functional Threshold Power ou Puissance au Seuil Fonctionnel)

La notion de FTP a été développée par le physiologiste Andrew R.Coggan : elle correspond à la **puissance la plus élevée qu'il est possible de soutenir pendant 1 heure d'effort**. C'est donc la puissance critique sur 1 heure.

LA FTP est donc un niveau d'effort proche mais inférieur au seuil S2. Le test de Coggan (https://fr.wikipedia.org/wiki/Test_de_Coggan) permet d'estimer la FTP à partir de la connaissance de la puissance critique sur 20 minutes (CP20) en multipliant cette valeur par 95% : **FTP = 0.95 X CP20**.

A partir de la FTP, Coggan a établi **7 zones de puissance** pour calibrer l'entraînement :

Zone 1	Récupération active	< 55% FTP
Zone 2	Endurance	56 à 75 FTP
Zone 3	Tempo	76 à 90% FTP
Zone 4	Seuil lactique	91 à 105% FTP
Zone 5	VO ₂ max	106 à 120% FTP
Zone 6	Capacité anaérobie	121 à 150% FTP
Zone 7	Puissance neuromusculaire	> 150% FTP

L'échelle ESIE de Grappe et al. (1999) repose davantage sur la perception subjective de l'effort et sur la PMA que sur la FTP

Certains logiciels de suivi et d'analyse de l'entraînement (*Garmin Connect, TrainingPeaks, Nolio*) ou des plateformes (*Zwift, Technogym MyCycling, Rouvy...*) utilisent la valeur FTP pour analyser les intensités d'efforts réalisées durant les séances.

Nom	Prénom	FTP absolue	FTP relative

VIII. Conclusion sur la transition aérobie – anaérobie

Le passage d'une contribution aérobie à une contribution anaérobie selon l'intensité de l'effort n'est pas brutal : elle se fait progressivement mais avec deux ruptures : au seuil aérobie (S1), et au seuil anaérobie (S2). Corrélativement, la production de lactate augmente de façon continue mais non linéaire.

Entre le seuil aérobie et le seuil anaérobie la production de lactate est « sous contrôle » : les processus de production sont compensés par les processus d'élimination. **Le seuil anaérobie se définit comme le niveau d'intensité d'effort le plus élevé où l'équilibre entre la production et l'élimination de lactate est maintenu.**

Pour résumer :

- La transition aérobie – anaérobie est un très bon critère d'endurance, complémentaire de $VO_2\text{max}$ (elle détermine la capacité à utiliser le % le plus élevé possible de sa consommation d'oxygène sans accumulation excessive de lactate).
- Elle est directement liée à l'aptitude aérobie du muscle.
- Elle est plus sensible aux influences de l'entraînement que $VO_2\text{max}$.
- Les seuils sont un paramètre important pour le contrôle de l'entraînement en endurance notamment S2 (connaissance de sa FC au seuil et de sa puissance au seuil et pour le coureur à pied de sa vitesse au seuil).
- La technique ventilatoire de détermination (mesure de $QR > 1$) semble donner des résultats plus fiables que la méthode mesurant l'acide lactique.
- L'explication physiologique de cette notion est encore incertaine.

VIII. Exercice

Situez les indicateurs ci-dessous le long de cette échelle d'intensité d'effort :

- Seuil aérobie
- PMA
- Seuil anaérobie
- SV1
- $QR = 1.1$
- $VO_2\text{max}$
- FTP
- Puissance maximale
- $QR = 1$
- SV2
- $QR = 0.7$
- CP20

