

BULLETIN SCIENTIFIQUE 2017 (1)

1-C'est quoi la transition aéro-anaérobie ?

Comme rappelé dans le Bull. Sport Trav. Biol. , N°4, 2016, lors d'une activité physique de **puissance dite « sous-maximale »**, puissance se traduisant par une dépense énergétique supérieure à la dépense énergétique posturale (DE_{post}) et inférieure à la dépense énergétique aérobie maximale (DE_{ma}), les besoins énergétiques sont couverts par la dégradation de différentes réserves métaboliques essentiellement lipidiques et glucidiques. Dans cette plage de puissances inférieures à la puissance maximale aérobie (P_{ma}) il est licite d'assimiler le résultat de ces transformations d'énergie chimique en énergie mécanique à la « combustion de carburants » d'un moteur thermique utilisant l'oxygène de l'air comme comburant. Pour les dépenses énergétiques faibles le carburant préférentiel est lipidique ; pour les puissances élevées les glucides dont les premières étapes de transformation s'effectuent en anaérobiose. Pour une activité de forte puissance dite « **supra-maximale, P_{sm}** », du fait du plafonnement de l'apport en oxygène, le **surcroît de dépense énergétique, $DE_{sm} - DE_{ma}$** , ne peut plus être assuré que par une dégradation exclusivement anaérobie des réserves glucidiques et une accumulation de déchets métaboliques délétères.

La plage des **activités sous-maximales** se caractérise donc par une **transition** progressive entre un métabolisme à dominante **lipidique obligatoirement aérobie** pour les faibles puissances et un métabolisme à dominante **glucidique aérobie et anaérobie** pour celles proches de la P_{ma} . Tant que la puissance imposée reste inférieure à la puissance dite de « **transition aéro-anaérobie, P_{tr}** », le débit de production des métabolites intermédiaires comme le lactate reste compensé par le débit d'utilisation de ces mêmes métabolites grâce aux transformations aérobies conduisant à leur dégradation complète en dioxyde de carbone CO_2 et eau H_2O . Mais au-dessus de cette P_{tr} une « dérive métabolique » liée à un déséquilibre entre débit d'utilisation et débit de production va se caractériser par une accumulation tissulaire et sanguine de différents produits du métabolisme (protons, ammoniac, ...) dont le lactate en est un bon témoin.

2- Le cœur et la respiration sont-ils de bons témoins de la dépense énergétique ?

La régulation physiologique des systèmes de transferts gazeux entre milieux intérieur et extérieur (appareil respiratoire) et de transport-distribution d'énergie chimique entre sang circulant et muscles au travail (appareil cardiovasculaire), s'accompagne donc d'une élévation simultanée des débits correspondant, **débit cardiaque $^{\circ}Q$ et débit respiratoire $^{\circ}V_E$** . Ces deux systèmes fonctionnent comme des pompes alternatives dont le débit est le produit d'un volume par une fréquence, volume d'éjection systolique par la fréquence cardiaque $V_{es} \times FC$, volume courant par la fréquence respiratoire $V_T \times FR$.

Les adaptations des volumes mobilisés du fait des caractéristiques anatomiques et mécaniques de ces pompes sont essentiellement soumises à des règles mécaniques simples, limitées en amplitude et intervenant surtout pour des puissances faibles. A contrario les fréquences sont soumises à un système de régulation très puissant via différents capteurs et boucles de régulation, le système nerveux central système de commande et régulation, et les voies motrices centrifuges à destination du muscle cardiaque et des muscles respiratoires, en particulier le diaphragme. Des fonctions autres que celle de la couverture des besoins énergétiques sont certes assignées à ces appareils. Mais ces fonctions sont soit secondaires (par exemple la thermolyse respiratoire) soit annihilées dès que les puissances deviennent importantes (par exemple la parole).

Il résulte des rappels précédents que pour un même individu, une même activité de puissance °W et des conditions environnementales identiques, la fréquence cardiaque FC et la fréquence respiratoire FR présentent des relations fortes et reproductibles avec la dépense énergétique DE. Ces relations sont de type puissance :

$$(0) F_w = F_o + b * (DE_w - DE_o)^m$$

« w » : la grandeur affectée de cet indice est celle correspondant à l'activité de puissance °W.

« o » : la grandeur affectée de cet indice est celle correspondant à une valeur basale initiale :

-soit de « repos statique » réel dans les conditions de posture fondamentale imposée par l'activité (par exemple debout pour la marche),

- soit de « repos dynamique » théorique dans les conditions de posture fondamentale imposée par l'activité en l'absence de déplacement du centre de gravité corporel ou de restitution d'énergie mécanique au milieu extérieur (par exemple assis, pédalage à vide sur cycle ergométrique sans résistance). Cette grandeur théorique est obtenue dans la plupart des cas par rétro-extrapolation de (0) et indiquée alors par « p ».

Pour FC l'exposant « m » est souvent proche de 1 et la relation généralement assimilée à une relation linéaire :

$$(1) FC_w = FC_o + b * (DE_w - DE_o)$$

Pour FR l'exposant « m = 1 / (1-e) » est en moyenne proche de 3 ce qui se traduit sur un graphe représentatif de cette fonction par une courbe puissance classique à concavité tournée vers le haut.

$$(2) FR_w = FR_o + k * (DE_w - DE_o)^{(1/(1-e))}$$

NB:

Pour les matheux désireux d'approfondir leurs connaissances vous trouverez en fin de ce Bulletin un extrait de l'ouvrage ci-dessous référencé qui vous donnera plus de détails sur la construction de certaines des équations utilisées par le modèle mathématique de bioénergétique humaine Astrabio©, leur signification ainsi que quelques figures et exemples illustrant ce chapitre.

Dans la Collection : PERFORMANCE ET SANTE

JP ECLACHE

Mathématiques appliquées pour chercheurs en Biologie Humaine

Analyse : Fonctions d'une variable réelle $y = f(x)$, V- Fonctions puissance : $y = k * x^m$

3- Comment établir et utiliser les relations fréquence-dépense énergétique ?

La fréquence cardiaque et la fréquence respiratoire étant mesurables avec des outils peu onéreux et performants (cardio-fréquencemètres et pneumo-fréquencemètres), ces relations présentent maintenant un intérêt considérable pour deux applications de terrain essentielles : **la détermination de la dépense énergétique des activités et celle du suivi de l'aptitude.**

31- mesure de la dépense énergétique d'une activité

Cette mesure en situation nécessite simplement de réaliser au préalable, en service spécialisé sur ergomètre spécifique reproduisant l'activité concernée, une **épreuve « triangulaire »** de puissance progressivement croissante avec mesure simultanée de la dépense énergétique et des fréquences respiratoire et cardiaque. Il suffit ensuite d'enregistrer ces grandeurs FC ou FR en cours d'activité et de les introduire dans les relations (1) ou (2) établies précédemment.

32- mesure de l'aptitude aérobie d'un acteur

La détermination de **l'aptitude aérobie** nécessite d'en déterminer les deux principaux témoins : la **puissance aérobie maximale** et la **puissance de transition aéro-anaérobie**.

- dépense énergétique aérobie maximale DE_{ma}

En ce qui concerne DE_{ma} ou la puissance équivalente P_{ma} spécifique d'une activité donnée, il suffit de réaliser une **épreuve triangulaire** de terrain reproduisant cette même activité, d'en augmenter progressivement la puissance $^{\circ}W$ et d'enregistrer la fréquence cardiaque FC. En introduisant la valeur de **fréquence cardiaque maximale FC_m** dans la relation (1), on obtient facilement une excellente estimation de la dépense énergétique aérobie maximale ($^{\circ}VO_{2max}$) ou de la P_{ma} :

$$(3) \quad DE_{ma} = DE_o + (FC_m - FC_o) / b$$

- dépense énergétique de transition aéro-anaérobie DE_{tr} : (Fig.1)

En ce qui concerne DE_{tr} ou P_{tr} spécifiques d'une activité donnée, le protocole est identique mais en remplaçant la mesure de fréquence cardiaque par celle de fréquence respiratoire FR.

$$(4) \quad FR_{tr} = FR_o + k * (DE_{tr} - DE_o)^{(1/(1-e))}$$

L'introduction des limites aérobies physiologiques haute (DE_{ma} , FR_{ma}) et basse (DE_o , FR_o) auxquelles doit satisfaire l'équation, permet de la formuler plus simplement en remplaçant le coefficient « k » par son expression mathématique : $k = (FR_m - FR_o) / (DE_m - DE_o)^{(1/(1-e))}$

$$(5) \quad FR_{tr} = FR_o + (FR_m - FR_o) * ((DE_{tr} - DE_o) / (DE_m - DE_o))^{(1/(1-e))}$$

La relation puissance entre FR et DE intégrée dans le modèle mathématique de bioénergétique humaine Astrabio© est à elle seule très riche d'enseignement. Les paramètres de cette relation, coefficient multiplicateur et exposant, sont en effet représentatifs des qualités fondamentales de transfert, transport, distribution et utilisation d'énergie, supportées par les systèmes respiratoire, cardiovasculaire et métaboliques musculaire.

4- Quelle est la signification des coefficients de la relation $FR = f(DE)$?

Ces coefficients sont représentatifs des modalités de fonctionnement des systèmes de régulation biologique qui asservissent les fonctions cardiaque et respiratoire aux exigences de dépense énergétique. L'analyse statistique des corrélations entre ces deux types de grandeurs, en particulier la présence d'un coefficient de corrélation élevé, permettent d'attester de la puissance de ces régulations et la qualité des protocoles et enregistrements expérimentaux.

- Fréquence cardiaque et dépense énergétique

Lorsque la relation (1) est proche de la linéarité, le coefficient « b » traduit simplement que la résultante des stimulations du « pace-maker » cardiaque via les circuits moteurs centrifuges neuroendocriniens, et en particulier via l'activation sympathique, présente un lien direct et puissant de proportionnalité avec l'intégration centrale des différents stimuli physiques et chimiques en provenance des boucles de régulation centripètes mises en jeu par l'activité physique.

$$b = (DE_w - DE_o) / (FC_w - FC_o)$$

- Fréquence respiratoire et dépense énergétique

La relation (2) est une fonction puissance dont l'allure est très comparable à celle de différents produits du métabolisme intermédiaire dont l'accumulation et la diffusion dans les espaces liquidiens est d'autant plus marquée que la dépense énergétique est élevée. Tel est le cas par exemple du lactate ou des protons quand la dépense énergétique dépasse la dépense énergétique de transition. L'intégration des stimuli périphériques par le système de commande et régulation de la respiration prend donc en compte en plus de la dépense énergétique globale les conséquences potentielles délétères d'une accumulation des métabolites intermédiaires, et donc, la participation du métabolisme anaérobie à la fourniture énergétique totale.

+ le coefficient multiplicateur « $(FR_m - FR_o)$ » est caractéristique des modalités de fonctionnement du système respiratoire : il est l'inverse de l'efficacité respiratoire « ER » : $(FR_m - FR_o) = 1/ER$. Il est élevé dans les altérations fonctionnelles ou organiques de l'appareil respiratoire et des échanges gazeux (syndrome obstructif, restrictif, trouble de la diffusion alvéolo-capillaire), et élevé chez ceux dont les échanges gazeux sont performants. Une faible efficacité respiratoire se traduit graphiquement par un relèvement de la courbe représentative de la fonction (2) et, vice-versa, une bonne efficacité, par un abaissement (Fig. 2 page 19).

+ l'exposant « $1 / (1 - e)$ » est un paramètre caractéristique de l'endurance puisque « e » est le témoin direct de la disponibilité en réserves énergétiques tant quantitatif (quantité totale de réserves lipidiques et glucidiques) que qualitatif (en particulier aptitude à utiliser les lipides). Cette grandeur « e » est d'ailleurs proche du rapport $(DE_{tr}) / (DE_{ma})$ puisque « e » est égal à $(DE_{tr} - DE_o) / (DE_{ma} - DE_o)$. Le coefficient d'endurance « e » est voisin de 0.65 pour le Français moyen. Il est plus faible pour les sédentaires et peut même descendre en dessous de 0.5 dans certaines pathologies sévères ou enzymopathies affectant le métabolisme énergétique des lipides, comme dans l'insuffisance en palmitoyl-carnitine-transférase. A contrario, chez les sujets entraînés, il peut atteindre 0.8 ou même 0.9 chez les athlètes endurants de haut niveau pratiquant par exemple la course de fond ou le ski de fond. Une faible endurance se traduit graphiquement par une diminution de l'incurvation de la courbe représentative de la fonction (2) et une bonne endurance par une augmentation de cette même courbure (Fig. 3 page 19).

5- Le programme « 100T-seniors » : de quoi s'agit-il ?



« 100T-seniors » est un programme français développé par l'ASTB (Association Sport Travail Biologie) ayant pour objectif d'expertiser et de labelliser une centaine de circuits pédestres MeRCI-astb©, situés dans les parcs des principales villes françaises, afin que les seniors fragilisés puissent bénéficier d'un « Bio-Training » foncier aérobie à la marche de type « ESI », encadrés par des moniteurs ou animateurs bénévoles formés par l'ASTB (Fig. 4). L'abréviation MeRCI-astb© a pour objet de rappeler que les circuits ainsi labellisés sont utilisables pour y réaliser dans les conditions d'efficacité et de sécurité définies par le Comité Scientifique et d'Ethique de l'ASTB des réentraînements Métaboliques (Me), respiratoires (R), cardiovasculaires (C), individualisés (I).

Fig. 4 : Carte de France des villes de rattachement administratif dont le département possède un ou plusieurs circuits MeRCI-astb© faisant l'objet d'une expertise entre 2012 et 2017.

6- Qu'entendez-vous par seniors fragilisés ?

Les Seniors fragilisés sont les personnes âgées de plus de 50 ans présentant une dégradation de leur **aptitude aérobie** et de leur indépendance physique et psychique suite à des **pathologies aiguës ou chroniques** ayant nécessité un alitement, une immobilisation ou une hospitalisation ainsi que des traitements médicaux et/ou chirurgicaux lourds. Pour plus de précisions sur les pathologies concernées consulter la rubrique (7) et le Tableau I.

Pour ces seniors fragilisés, la récupération de leur indépendance motrice nécessite de mettre en œuvre un réentraînement foncier aérobie individualisé de type « ESI » pour lequel la marche est dans la majorité des cas l'exercice le mieux adapté à leur condition physique réduite. Ce réentraînement dont les modalités et en particulier l'intensité sont obligatoirement définies individuellement est alors qualifié de « **Bio-Training** ».

7- Quelles pathologies peuvent bénéficier de ce fameux entraînement « ESI » ?

Il s'agit en particulier des pathologies dites de « société » et en forte augmentation partout sur la planète : certaines maladies **dégénératives et cancéreuses**, des maladies **neurologiques** comme l'Alzheimer, des maladies **métaboliques** par exemple le diabète, des maladies **respiratoires** par exemple comme l'asthme bronchique ou différentes affections **cardiaques** comme l'infarctus du myocarde. Tous les travaux scientifiques réalisés depuis une trentaine d'années montrent à l'évidence que **l'entraînement physique est un traitement fondamental** et que ses résultats sont souvent supérieurs à ceux des traitements chimiques traditionnels (Tableau I : Tableau des 26 maladies expertisées par Pedersen et Saltin susceptibles de bénéficier d'un Bio-Training ou Entraînement Scientifique Individuel « ESI »).

TABLEAU-I

L'entraînement comme remède de 26 maladies chroniques

La liste présentée ci-après est issue de la revue actualisée de BK. PEDERSEN et B. SALTIN sur les travaux scientifiques qui montrent à l'évidence les effets thérapeutiques bénéfiques de la prescription d'entraînement physique sur la genèse et la symptomatologie de 26 maladies chroniques (*BK. PEDERSEN & B. SALTIN, Exercise as medicine - evidence for prescribing exercise as therapy in 26 different chronic diseases. Scand J Med Sci Sports 2015: (Suppl. 3) 25: 1-72*).

On ne peut que saluer cet exceptionnel travail de synthèse reprenant quelques 800 publications scientifiques issues de revues internationales à comité de lecture, réalisé par l'une des plus talentueuses équipes de médecins physiologistes spécialisés dans la biologie et la médecine de l'exercice. Cette mise à jour tombe fort à propos dans nos sociétés industrialisées frappées d'une augmentation catastrophique des maladies liées au sédentarisme et à la robotisation. Elle nous rappelle **la nécessité fondamentale et universelle que représente l'activité physique pour le bon développement et la survie de toutes les structures vivantes.**

MALADIES PSYCHIATRIQUES :

- dépression
- anxiété
- stress

- schizophrénie

MALADIES NEUROLOGIQUES

- démence

- maladie de Parkinson

- sclérose en plaques

MALADIES METABOLIQUES

- obésité

- hyperlipidémie

- syndrome métabolique

- syndrome ovarien polykystique

- diabète type 2

- diabète type 1

MALADIES CARDIOVASCULAIRES

- accident vasculaire cérébral

- hypertension

- maladie coronarienne

- infarctus du myocarde

- claudication intermittente

MALADIES PULMONAIRES

- syndrome obstructif chronique

- asthme bronchique

- fibrose kystique

TROUBLES MUSCULO-SQUELETTIQUES

- ostéo-arthrite

- ostéoporose

- mal de dos

- arthrite rhumatoïde

CANCER

Mais cette étude sera vraisemblablement complétée dans l'avenir pour au moins deux raisons essentielles :

- la première concerne l'existence de **plusieurs travaux personnels ou étrangers non référencés qui mettent en évidence un même effet positif dans différentes pathologies ne faisant pas l'objet de cette étude** : par exemple certaines enzymopathies telles le syndrome de Mac Ardle ou insuffisance en myo-phosphorylase, les suites d'accidents traumatiques grâce à l'accélération des processus de régénération tissulaire, les pathologies liées au dopage, certaines thérapeutiques abusives ou toxiques, etc. ...

- la deuxième concerne **l'optimisation des effets thérapeutiques de l'entraînement grâce à l'adaptation individuelle des caractéristiques spatio-temporelles mécaniques de l'activité prescrite** en termes de type d'activité, de masse corporelle mise en jeu, de forme de séance (relation intensité-temps), de durée et de répétitivité de séance, caractéristiques déterminées en fonction des données individuelles d'aptitude et d'inaptitude (*JP. ECLACHE, L'Entraînement Scientifique Individuel, Collection Performance et Santé, ASTB éd. 1999 : 207p*).

8- Quels sont les critères de sélection de ces circuits MeRCI-astb©?

S'agissant de seniors fragilisés ces circuits doivent être accessibles facilement, à usage sécurisé sans engins motorisés, présenter un sol de bonne qualité, régulier et stable, par exemple gravier de chaux compacté ou enrobé, exempt d'obstacles, avec des dénivelés modérés, un environnement naturel agréable (arbres, fleurs, plan d'eau...), des équipements urbains axés sur l'hygiène, la sécurité, le confort (WC, points d'eau, éclairages, bancs, tables, gardiennage, poste de secours...) et éventuellement sur des aspects éducatifs ou ludiques (Tableau II) Présentation des principaux critères de sélection des circuits MeRCI-astb©.

TABLEAU II

<p style="text-align: center;"><u>Circuits MeRCI-astb©</u> <i>Critères de Labellisation pour seniors fragilisés</i></p> <p>Les critères de labellisation sont édictés et mis à jour par le CSE. Ils sont regroupés sous cinq rubriques principales : 1-Accessibilité, 2-Sol, 3-Balisage, 4-Sécurité, 5-Environnement.</p> <p><i>Rappel : compte tenu des impératifs physiologiques et pratiques concernant la réalisation trois fois par semaine d'une séance d'entraînement de type « ESI », les parcours retenus sont d'une longueur allant en général de 1 à 5km. Le séquençage régulier de chaque parcours aboutit à définir 27 tronçons d'environ 50 à 200 mètres. Les 28 balises sélectionnées sont présentées sur une page au format A4 d'un photo-guide dont les temps inter-balises sont définis individuellement en fonction de l'aptitude de la personne concernée.</i></p> <p><u>1-Accessibilité</u> Il est nécessaire de juger des facilités d'accès et de transport pour les utilisateurs par rapport à leur domicile, un centre urbain, un service hospitalier,...Sont pris en compte la proximité, la présence de parking, la gratuité, la permanence quotidienne et saisonnière de l'accès, etc.</p> <p><u>2-Sol</u> De manière à ouvrir cette pratique au plus grand nombre y compris aux personnes présentant des déficits moteurs et des troubles de l'équilibre les sols doivent présenter une surface plane et permettre des appuis stables. Les sols artificiels, en enrobé, en gravier de chaux compacté, en bois artificiel, etc. ... sont de ce fait souvent très intéressants. Il faut éviter les dénivelés brusques, les escaliers, les sols bosselés de surface irrégulière, présentant trous, bosses, racines, ornières, touffes d'herbe,...les sols mous ou instables, cailloux roulants, terre humide et glissante, boue, neige, glace, sable profond ...</p> <p><u>3-Balisage</u> S'agissant d'un descriptif textuel et photographique de repères naturels existant, la présence d'éléments naturels ou artificiels pertinents et caractéristiques est essentielle. Il peut s'agir de caractéristiques topographiques propres du parcours, point haut, bas, virage prononcé, croisement,, mais aussi de balisages préexistants, de mobilier urbain, de réverbères, de bancs, de panneaux, de poteaux, de fontaines, de roches, d'arbres, portails, barrières, murs, etc. ...</p> <p><u>4-Sécurité</u> Sont pris en compte non seulement les éléments classiques, présence de défibrillateur, couverture téléphonique, poste de secours,... mais aussi les risques consécutifs soit à un usage strictement réservé aux piétons et/ou handicapés, soit à un usage mixte avec d'autres pratiques, vélos, rollers, etc., et donc le franchissement épisodique ou l'utilisation séquentielle de voies où circulent des engins motorisés.</p> <p><u>5-Environnement</u> Seront pris en compte différents équipements de confort, la présence de points d'eau, de toilettes, de poubelles, de structures permettant une protection climatologique contre la pluie, le soleil, le vent, la présence d'arbres, de bancs, de tables, d'un éclairage public, mais aussi ceux ayant un caractère ludique ou éducatif, panneaux descriptifs de la faune, de la flore, de l'environnement,..., les jeux, les agrès....</p>

9- Qu'est-ce que c'est que cet entraînement « ESI »?

« L'ESI » signifie « **Entraînement Scientifique Individuel** ». C'est un « **Bio-Training** », c'est-à-dire un **entraînement optimisé** dont l'intensité, la durée et la rythmicité permettent d'améliorer le potentiel aérobie et l'aptitude tout en réduisant les inaptitudes. Ses principes et méthodes publiés par l'ASTB en 1999 dans l'ouvrage de référence (Tableau III), sont l'aboutissement d'une trentaine d'années de travaux scientifiques fondamentaux qui ont fait l'objet de nombreuses publications et applications sur le terrain à des collectivités différant par l'âge, le sexe, le mode de vie, la profession, l'aptitude et les inaptitudes, allant d'athlètes de haut niveau préparant un record du monde à des inaptes majeurs comme des myopathes désireux de retrouver une indépendance motrice.

Tableau III

Jean-Paul ECLACHE.
L'Entraînement Scientifique Individuel,
Collection Performance et Santé, ASTB éd., 1999 : 207p.

Voici enfin l'ouvrage qu'attendaient les nombreux acteurs de l'entraînement toujours confrontés à ce problème fondamental de son individualisation. La recherche de performance dans le respect d'une éthique médicale et scientifique imposant de préserver l'intégrité et la santé individuelles n'intéresse pas que le sportif de haut niveau ; elle intéresse aussi tous ceux qui, pour des raisons d'aptitude professionnelle, des raisons médicales diagnostiques ou thérapeutiques, en particulier de rééducation, ou plus simplement de mieux être ou d'hygiène de vie, cherchent à améliorer leur aptitude dans les meilleures conditions de rapidité et de sécurité. Un même souci d'efficacité guide l'auteur qui réussit l'exploit de nous fournir en un minimum de pages la synthèse d'une expérience pluridisciplinaire exceptionnelle débutée en 1977 avec la création de l'ASTB.

Contrairement aux ouvrages traditionnels qui jettent pêle-mêle dans la marmite de potion magique une multitude de recettes empiriques assaisonnées d'une pincée de scientisme censé en améliorer la saveur et la digestibilité, il s'agit là d'une construction originale, rigoureuse et logique, fortement inspirée de la triple formation de l'auteur, scientifique, médicale et biologique. Vous ne pourrez donc pas sauter de chapitre sans perdre d'efficacité et de précision sur la planification qui fait l'objet du dernier chapitre, et sans risquer de retomber dans le travers traditionnel des erreurs de sous ou sur entraînement ! En revanche, vous y trouverez à chaque étape tous les outils, la démarche méthodologique, les avertissements, les protocoles, les exemples concrets et les calculs, permettant de reproduire à titre individuel la méthode pragmatique proposée.

Cet ouvrage est donc un outil pour tous les étudiants ou les professeurs qui, comme lui, ont la responsabilité d'enseignements spécialisés de Physiologie de l'Exercice et de la Performance dans les nombreuses formations concernées comme en STAPS, en Ergonomie, en Médecine, en GBM, etc. Mais au-delà de cet intérêt pédagogique, son expérience de terrain exceptionnelle comme Directeur de Recherches du Laboratoire de la Performance ASTB, résolument axé sur la finalisation de la recherche fondamentale, en tant que Médecin des Equipes de France et comme Conseiller Technique Médical et Recherche, détaché à la Préparation Olympique, lui permet d'illustrer chacune des étapes de sa démarche des exemples concrets d'athlètes ou d'équipes de renom dont la préparation et le suivi ont conduit à différents records de niveau mondial. C'est donc aussi un guide indispensable pour les sujets sportifs ou simplement actifs, privés d'encadrement technique structuré, et un ouvrage de référence pour les entraîneurs, médecins, préparateurs, éducateurs ou rééducateurs physiques soucieux de l'optimisation des individus et des collectivités dont ils ont la responsabilité.

E.A.N.: 9 782951 4280607

I.S.B.N. : 2-9514286-0-X

*Prix public 45 €

*Cet ouvrage est consultable gratuitement pour les membres des CSTB régulièrement enregistrés.

10- Quels sont les grands principes de ce Bio-Training « ESI » ?

1-L'activité doit être **globale** c'est à dire mettre en jeu une importante masse musculaire ; 2- l'intensité de chaque séance doit être proche de la **transition aéro-anaérobie** du senior concerné ; 3-sa durée est d'environ **une heure** ; 4-sa rythmicité est d'une séance **tous les deux à trois jours** ; 5-la montée en puissance jusqu'à ce niveau doit se faire progressivement sur **20 à 30 minutes** environ.

Pour la majorité des seniors français fragilisés, l'activité répondant le mieux à l'ensemble de ces critères est **la marche** et donc, pour un senior particulier, à une **vitesse** et une **charge** donnée particulière, **spécifique de son aptitude et/ou de ses inaptitudes**.

11- Mais en pratique comment déterminer la vitesse de marche idéale ?

En pratique le senior fragilisé sort d'une consultation ou d'une hospitalisation avec une indication personnelle de **l'intensité cible à atteindre ou de la limite à ne pas dépasser** qui est généralement proche de sa **transition aéro-anaérobie**. Il peut s'agir d'une **dépense d'énergie**, d'une **fréquence cardiaque** ou **respiratoire**, d'une **puissance** réalisée sur bicyclette ergométrique, d'une **vitesse** ou d'une **cadence de pas** sur tapis roulant.

Ces indications sont adressées au Médecin-chef du département Médical ASTB qui détermine la **vitesse de marche** pour un Bio-Training personnalisé optimal de type « ESI ». Il adresse au senior, et/ou au Moniteur du Club d'affiliation agréé, un fascicule du **circuit MeRCI-astb©** sélectionné avec mention des **temps de parcours** à faire respecter par ce senior sur chacune des séquences délimitées par les différents repères photographiques du **Photo-guide**.

12- Sur le terrain comment peut-on contrôler et imposer une vitesse de marche ?

Certes il n'existe pas de « speedomètres » à la marche. Mais c'est justement l'une des fonctions importantes du moniteur agréé et diplômé que d'être un « lièvre » fiable capable de marcher à des vitesses prédéfinies. Pour ce faire il apprend lors de sa **formation de « Moniteur PS1 »** à s'étalonner en réalisant une épreuve de marche sur terrain plat à vitesse progressivement croissante durant laquelle il établit la **relation personnelle** existant entre sa **cadence de pas et sa vitesse de déplacement à la marche**. Cette relation individuelle très forte et reproductible en l'absence d'obstacles ou de contraintes additionnelles anormales ou excessives, vent, maladie, port de charges, etc...., lui permet ensuite, soit spontanément avec l'habitude, soit à l'aide d'un petit métronome électronique, de se déplacer à une vitesse choisie pour **servir de guide ou de « lièvre »** aux seniors en rééducation.

13- Comment gérer une séance de Bio-Training « ESI » sur circuit « MeRCI-astb© » ?

Le « Moniteur PS1 » vérifie en premier les **indications médicales** des seniors fragilisés qu'il encadre ainsi que leur fascicule MeRCI-astb© personnalisé afin de s'assurer de l'homogénéité du groupe. Il déduit de la vitesse moyenne des séquences de terrain plat sa cadence personnelle correspondante. Après les vérifications d'usage concernant les équipements, il enclenche son chronomètre et entame la première séquence du circuit entre la « balise nature » N°1 et la balise N°2, à vitesse de marche lente, de façon à imposer un temps de déplacement très supérieur au temps indiqué sur le Photo-guide sous la photo N°2. Il augmente alors légèrement sa vitesse et ainsi de suite au passage devant les repères suivants de façon à ne se rapprocher que très progressivement, en **20 à 30 min**, des temps indicatifs mentionnés sur le photo-guide. L'heure qui suit est consacrée à vérifier qu'au passage devant les différentes balises, les temps de marche sont alors voisins des temps indicatifs.

14- Pourquoi mettre 20 à 30 minutes pour atteindre une vitesse cible ?

Lorsqu'on passe brutalement d'un niveau de contrainte, de vitesse ou de puissance basse à un niveau plus élevé, le surplus d'exigence énergétique est instantanément fourni par les réserves locales de notre supercarburant biologique (Adénosine Triphosphate ATP et Phospho-créatine PC) dont malheureusement la quantité est très faible. La dégradation de ces molécules est restaurée grâce à l'augmentation du fonctionnement de toutes les voies métaboliques classiques, en particulier glycolyse anaérobie, glycolyse aérobie et lipolyse aérobie. Mais les constantes de temps* de ces voies vont de quelques secondes pour la première à environ une minute pour la deuxième et plus d'une heure pour la dernière. Ce qui signifie que leur vitesse d'adaptation est très lente pour les lipides, moyenne pour les glucides en aérobiose et rapide pour les glucides en anaérobiose. Sans échauffement préalable progressif, l'utilisation des glucides en anaérobiose conduit à une production accélérée d'acide pyruvique et lactique. S'ensuit une accumulation intracellulaire et une diffusion dans le liquide interstitiel et le sang circulant se traduisant par un « overshoot » temporaire de la lactatémie et de différents produits délétères, en particulier radicaux libres et protons H⁺. Chez les personnes saines cette phase critique de sensation subjective de pénibilité globale avec dyspnée aboutit généralement à une phase d'équilibre et de mieux être qualifiée de « second souffle ». En revanche elle peut aboutir chez les fragilisés au déclenchement d'anomalies cardiovasculaires, troubles du rythme, insuffisance coronarienne, etc.De plus, chez les seniors, le vieillissement organique s'accompagne d'un ralentissement des transferts membranaires et des transformations énergétiques affectant les mécanismes aérobies, en particulier l'utilisation des lipides, ce qui conduit à majorer les processus anaérobies. Les phases d'échauffement sont donc obligatoires et plus longues que chez les jeunes.

**NB : une erreur classique catastrophique de par ses conséquences en matière d'entraînement, est de confondre « constante de temps τ » et « délai ». τ est le temps qu'aurait mis le phénomène à atteindre sa consigne si sa vitesse d'adaptation était restée identique à sa vitesse initiale. Le délai est la durée du retard avant la mise en route de l'adaptation d'un phénomène.*

15- Peut-on quantifier les bienfaits de cet entraînement ?

Au-delà des sensations subjectives de mieux être toujours critiquables ou des observations classiques concernant la reprise d'activités quotidiennes abandonnées, faire son ménage ou sa cuisine, aller au marché, participer à différentes activités physiques encadrées, etc..., **la formation de « Moniteur PS2 »** fournit les outils et les méthodes d'appréciation et de suivi des deux principaux témoins de l'aptitude bioénergétique, **puissance aérobie et endurance**. Parmi celles-ci, la plus simple consiste, toutes les 12 séances environ, soit à peu près une fois par mois, à profiter de l'exercice d'échauffement progressif de 20 à 30 minutes pour enregistrer l'évolution de la **fréquence cardiaque** et de la **fréquence respiratoire**. De façon à obtenir des résultats fiables, il faut simplement normaliser ce test sur une séquence plate de distance connue proche de 100 mètres et y effectuer des allers et retours en suivant toujours la même progression de cadence et donc de vitesse. La réduction de l'évolution temporelle des fréquences fournit une appréciation qualitative de l'amélioration obtenue ; le traitement de ces données par le département médical de l'ASTB fournit une appréciation quantitative de la **consommation maximale d'oxygène** (avec puissance et/ou vitesse maximale aérobie) et de la **transition aéro-anaérobie** (avec puissance et/ou vitesse de transition).

16- Un Club CSTB pourrait-il sélectionner d'autres circuits que ceux existant ?

Certainement, et c'est l'un des grands objectifs de l'ASTB, dans le cadre de **la formation de « Moniteur PS3 »**, que d'inciter des moniteurs de niveau « PS2 » à apprendre à manipuler les matériels adéquats et acquérir les méthodes d'expertise afin de multiplier les circuits labellisés pouvant être mis à disposition des seniors fragilisés.

Jean-Paul ECLACHE

MATHEMATIQUES APPLIQUEES

Pour chercheurs en Biologie Humaine

ANALYSE : Fonctions d'une variable réelle : $y = f(x)$

TABLE DES MATIERES

I-Fonctions circulaires
II-Fonctions circulaires inverses
III-Fonctions exponentielles
IV-Fonctions logarithmes
V-Fonctions puissances
VI-Fonctions hyperboliques
VII-Fonctions hyperboliques inverses

INTRODUCTION

Le traitement des données issues d'un travail expérimental a pour principal objectif dans la plupart des cas de répondre à une question formulée dans une hypothèse de travail : y-a-t'il une relation entre une grandeur « x » et une grandeur « y », quelle en est la réalité, la force, la fiabilité, la reproductibilité ? y-a-t'il une relation de causalité ? Comment décrire au mieux le phénomène mis en évidence, comment transmettre le fruit d'un travail expérimental ?

Pour traiter ces questions, les chercheurs en Biologie Humaine, comme la majorité des autres chercheurs, sont amenés à utiliser en permanence l'outil mathématique et statistique et en particulier les fonctions sous forme numérique et graphique. En l'absence de bases mathématiques et statistiques sérieuses, la stratégie la plus communément utilisée consiste à soumettre à l'aveugle les résultats expérimentaux obtenus à une série de fonctions disponibles sur ordinateur et à ne conserver que celle fournissant apparemment la meilleure corrélation.

Cette manière de procéder peut présenter différents travers : par exemple celui de rejeter sur des critères statistiques imposés par une « orthodoxie » scientifique autoritariste, stérilisante et donc anti-scientifique, des modèles de qualité en oubliant qu'une non significativité peut être le fait, non du modèle, mais simplement du choix d'un seuil de significativité inadéquat ou de différents facteurs connexes non maîtrisés ou non maîtrisables. A contrario, un second travers consiste à conserver des fonctions comportant un certain nombre de paramètres ou de coefficients qui n'ont malheureusement aucune signification physiologique véritable. De telles procédures sont donc susceptibles de conduire à de longues discussions truffées de supputations et de nouvelles hypothèses et, dans la logique des progressions à tâtons et des essais-erreurs, à une multiplication de nouvelles expérimentations inadaptées et coûteuses.

Comme pour un appareil dont on n'aurait ni lu la notice technique ni compris le mécanisme de fonctionnement, l'utilisation empirique de ces fonctions peut donc conduire à bien des déboires. A l'inverse, le choix ou la construction d'un modèle mathématique dont on connaît à l'avance les propriétés intrinsèques et les limites permet d'y faire figurer des paramètres respectant les connaissances physiologiques préexistantes.

L'objet de ce petit traité sera donc, au travers de différents exemples et travaux de recherche personnels en biologie humaine, de fournir au lecteur qui n'a pu bénéficier d'une formation mathématique supérieure ou spéciale, quelques propriétés caractéristiques intrinsèques de différentes fonctions mathématiques simples.

MATHEMATIQUES APPLIQUEES

Pour chercheurs en Biologie Humaine

ANALYSE : Fonctions d'une variable réelle : $y = f(x)$

Chapitre V - Fonctions puissances : $y = k \cdot x^m$

Fonction puissance passant par deux points remarquables : (x_0, y_0) & (x_m, y_m)

Conditions : $x_0 < ou = x < ou = x_m$ & $y_0 < ou = y < ou = y_m$

Construction de l'équation satisfaisant les conditions (x_0, y_0) & (x_m, y_m)

$$\begin{array}{l} (x_0, y_0) \quad x = x_0 \text{ \& } y = y_0 \\ \text{Solution} \quad \rightarrow y = y_0 + k * (x - x_0)^m \\ (x_m, y_m) \quad x = x_m \rightarrow y_m = y_0 + k * (x_m - x_0)^m \\ \text{Solution} \quad \rightarrow k = (y_m - y_0) / (x_m - x_0)^m \end{array}$$

Ecriture de l'équation de la fonction puissance

$$(1) y = y_0 + k * (x - x_0)^m = y_0 + (y_m - y_0) / (x_m - x_0)^m * (x - x_0)^m$$

Tangentes caractéristiques passant par les points remarquables : (x_0, y_0) & (x_m, y_m)

Equation de la tangente passant par: (x_m, y_m)

Equation générale de la droite passant par (x, y)

$$y = a * x + b$$

Calcul de a, pente de la tangente au point (x, y) : dérivée première de (1)

$$(2a) \quad a = f'(x) = m * k * (x - x_0)^{(m-1)} = m * (y_m - y_0) / (x_m - x_0)^m * (x - x_0)^{(m-1)}$$

Calcul de a, pente de la tangente au point (x_m, y_m)

$$\begin{aligned} a &= m * k * (x_t - x_0)^{(m-1)} = m * (y_m - y_0) / (x_m - x_0)^m * (x_m - x_0)^{(m-1)} \\ a &= m * k * (x_t - x_0)^{(m-1)} = m * (y_m - y_0) / (x_m - x_0)^m \end{aligned}$$

Calcul de b, ordonnée à l'origine de la tangente au point (x, y)

$$\begin{aligned} b &= y - a * x \\ \rightarrow b &= y - m * k * (x - x_0)^{(m-1)} * x \\ \rightarrow b &= y - m * (y_m - y_0) / (x_m - x_0)^m * (x - x_0)^{(m-1)} * x \end{aligned}$$

Calcul de b, ordonnée à l'origine de la tangente au point (x_m, y_m)

$$\begin{aligned} b &= y_m - m * (y_m - y_0) / (x_m - x_0)^m * (x_m - x_0)^{(m-1)} * x_m \\ b &= y_m - m * (y_m - y_0) / (x_m - x_0)^m * x_m \end{aligned}$$

Ecriture de l'équation de la de la tangente passant par (x_m, y_m)

$$y = m * (y_m - y_0) / (x_m - x_0)^m * x + y_m - m * (y_m - y_0) / (x_m - x_0)^m * x_m$$

$$(2) y = y_m + m * (y_m - y_0) / (x_m - x_0)^m * (x - x_m)$$

Equation de la tangente passant par: (x_0, y_0)

$$(3) y = y_0$$

Premier point caractéristique de la fonction puissance (1)

Abscisse du point d'intersection entre les deux tangentes : (x_t, y_t)

$$(2)(3) \quad \begin{aligned} y_o &= y_m + m * (y_m - y_o) / (x_m - x_o) * (x_t - x_m) \\ m &= (x_m - x_o) / (x_m - x_t) \\ (x_m - x_t) &= (x_m - x_o) / m \end{aligned}$$

$$(4) \quad x_t = x_m - (x_m - x_o) / m = x_o + (x_m - x_o) * ((m-1)/m)$$

Ordonnée du point de la fonction puissance de même abscisse : (x_t)

$$(1)(4) \quad \begin{aligned} y_t &= y_o + (y_m - y_o) / (x_m - x_o)^m * (x_t - x_o)^m \\ y_t &= y_o + (y_m - y_o) / (x_m - x_o)^m * (x_t - x_m + x_m - x_o)^m \\ y_t &= y_o + (y_m - y_o) / (x_m - x_o)^m * (-x_m - x_o) / m + x_m - x_o)^m \\ y_t &= y_o + (y_m - y_o) / (x_m - x_o)^m * ((x_m - x_o) * (1 - 1/m))^m \end{aligned}$$

$$(5) \quad y_t = y_o + (y_m - y_o) * ((m-1)/m)^m$$

Second point caractéristique de la fonction puissance (1)

Droite passant par les points remarquables : (x_o, y_o) & (x_m, y_m)

$$\begin{aligned} y &= a * x + b \\ y_m &= a * x_m + b \\ y_o &= a * x_o + b \\ \rightarrow a &= (y_m - y_o) / (x_m - x_o) \\ (6a) \quad \rightarrow b &= (y_o * x_m - y_m * x_o) / (x_m - x_o) \end{aligned}$$

$$(6) \quad y = (y_m - y_o) / (x_m - x_o) * x + (y_o * x_m - y_m * x_o) / (x_m - x_o)$$

Droite parallèle à (6) et tangente à la fonction puissance ; calcul de l'abscisse : (x_s)

$$\begin{aligned} (6a) \quad a &= (y_m - y_o) / (x_m - x_o) \\ (2a) \quad a &= f'(x) = m * (y_m - y_o) / (x_m - x_o)^m * (x_s - x_o)^{(m-1)} \\ \rightarrow (y_m - y_o) / (x_m - x_o) &= m * (y_m - y_o) / (x_m - x_o)^m * (x_s - x_o)^{(m-1)} \\ \rightarrow (x_s - x_o)^{(m-1)} / (x_m - x_o)^{m-1} &= 1 / m \\ \rightarrow (x_s - x_o) / (x_m - x_o) &= (1 / m)^{1/(m-1)} \\ \rightarrow (x_s - x_o) &= (x_m - x_o) * (1 / m)^{1/(m-1)} \end{aligned}$$

$$(7) \quad x_s = x_o + (x_m - x_o) * (1 / m)^{1/(m-1)}$$

Droite parallèle à (6) et tangente à la fonction puissance ; calcul de l'ordonnée : (y_s)

$$(1)(7) \quad \begin{aligned} y &= y_o + (y_m - y_o) / (x_m - x_o)^m * (x - x_o)^m \\ y_s &= y_o + (y_m - y_o) / (x_m - x_o)^m * (x_s - x_o)^m \\ y_s &= y_o + (y_m - y_o) / (x_m - x_o)^m * (x_m - x_o)^m * (1 / m)^{m/(m-1)} \end{aligned}$$

$$(8) \quad y_s = y_o + (y_m - y_o) * (1 / m)^{m/(m-1)}$$

Exemple d'application pratique : FR = f(DE)

Détermination de la transition aéro-anaérobie à partir de la Fréquence Respiratoire FR

Un senior de 70 ans ayant préalablement réalisé une épreuve d'effort en service spécialisé avec détermination de sa consommation maximale d'oxygène ($DE_{max} = 34.2 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$) réalise une épreuve de marche à vitesses progressivement croissantes sur un circuit labellisé MeRCI-astb© pour évaluer le niveau de sa transition aéro-anaérobie. Le protocole triangulaire est réalisé en suivant une cadence de pas progressivement croissante fournie par un métronome électronique. L'enregistrement expérimental simultané de ses temps de passage « t » et de ses fréquences respiratoires « FR » au passage devant les « balises nature » de ce circuit est adressé au Laboratoire de la Performance ASTB pour détermination de sa transition aéro-anaérobie. Les étapes de l'exploitation réalisée par le département médical sont illustrées ci-après :

Tableau des valeurs numériques expérimentales

Les distances inter-balises « d » divisées par les temps relevés expérimentalement « t » fournissent les vitesses de progression moyennes de chacune des séquences de marche. Les dépenses énergétiques correspondantes « DE » sont fournies par le modèle mathématique de bioénergétique humaine Astrabio© en fonction des caractéristiques biométriques et bioénergétiques du senior et des caractéristiques physiques du circuit préalablement labellisé. Les valeurs obtenues sont présentées dans le Tableau I et la Figure 1:

Tableau I

Fréquence Respiratoire FR min^{-1}	13	13	13.2	13.2	13.5	14	14.5	15.5
Dépense Énergétique DE $\text{ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$	9.5	9.9	11.8	12.3	13.8	15.3	16.7	18.6

Le lissage mathématique par technique des moindres carrés fournit un excellent coefficient de corrélation ($R^2 = 0.999$) qui traduit à la fois la qualité de l'épreuve de terrain et la pertinence du choix de la fonction puissance dans la modélisation du phénomène biologique.

Equation mathématique de la fonction représentative

$$(1) \quad FR = FR_p + k * (DE - DE_p)^m$$

Avec $FR_p = 13 \text{ min}^{-1}$ & $DE_p = 7.97 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
 $k = 0.00314$ & $m = 2.867$

Coordonnées de (FR_t, DE_t) point caractéristique de la transition aéro-anaérobie

-détermination par la technique des tangentes aux points caractéristiques du repos debout et du maximum aérobie respectivement (FR_p, DE_p) et (FR_m, DE_m)

$$(4) \quad DE_t = DE_m - (DE_m - DE_p)/m = DE_p + (DE_m - DE_p) * ((m-1)/m)$$

Résultat : $DE_t = 25.1 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

$$(5) \quad FR_t = FR_p + (FR_m - FR_p) * ((m-1)/m)^m$$

Calcul de FRm avec équation (1) $FR_m = 49.7 \text{ min}^{-1}$

Résultat : $FR_t = 23.7 \text{ min}^{-1}$

-détermination par la technique de la tangente parallèle à la droite passant par les points caractéristiques du repos debout et du maximum aérobie (FRp, DEp) et (FRm, DEM).

$$(6) \quad DE_r = DE_p + (DE_m - DE_p) * (1/m)^{1/(m-1)}$$

Résultat : $DE_r = 22.9 \text{ ml.min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$(7) \quad FR_r = FR_p + (FR_m - FR_p) * (1/m)^{m/(m-1)}$$

Résultat : $FR_s = 20.3 \text{ min}^{-1}$

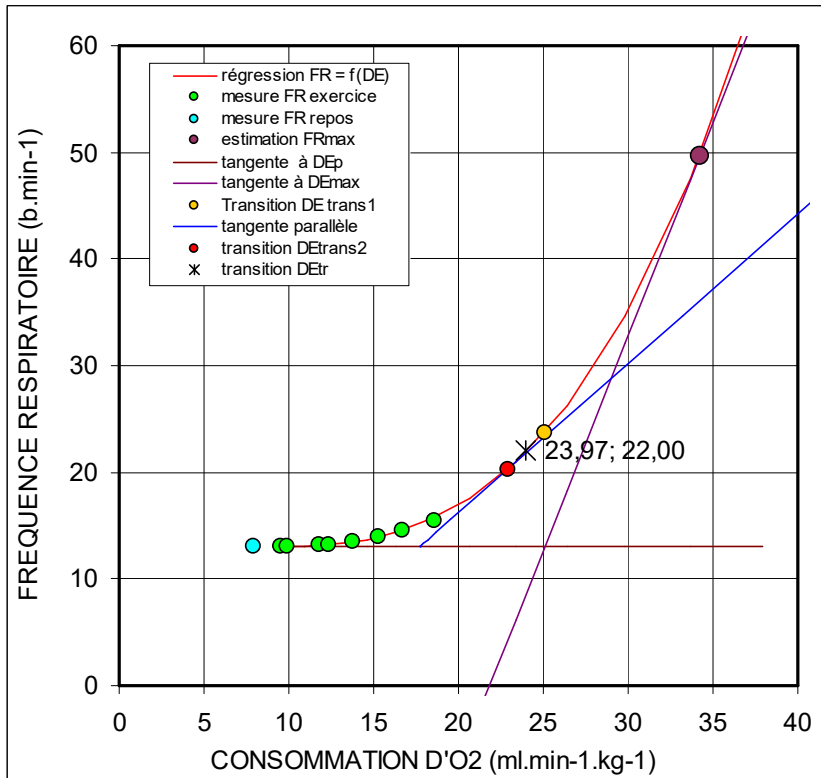


Figure 1 :

Les deux techniques utilisées ici présentent l'avantage considérable d'être **indépendantes du choix arbitraire** d'un opérateur sélectionnant en fonction de son humeur un nombre restreint de données expérimentales.

La moyenne des valeurs obtenues par ces deux techniques fournit donc une solution particulière **de la transition aéro-anaérobie reproductible** quel que soit l'opérateur.

-détermination par les deux techniques (moyenne des résultats)

$$(4)(6) \quad DE_{tr} = \frac{1}{2} * [DE_p + (DE_m - DE_p) * ((m-1)/m + (1/m)^{1/(m-1)})]$$

Résultat : $DE_{tr} = 23.97 \text{ ml.min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$(5)(7) \quad FR_{tr} = \frac{1}{2} * [FR_p + (FR_m - FR_p) * ((m-1)/m)^m + (1/m)^{m/(m-1)}]$$

Résultat : $FR_s = 22.00 \text{ min}^{-1}$

Incidence de l'efficacité respiratoire et de l'endurance sur les points remarquables

Dans le modèle mathématique de bioénergétique humaine Astrabio© :

- l'efficacité respiratoire « ER », caractéristique des modalités de fonctionnement du système respiratoire, est définie comme étant l'inverse du coefficient multiplicateur « (FR_m-FR_p) » :

$$(8) \quad ER = 1/(FR_m - FR_p)$$

- le coefficient « e », rapport de la plage de dépense énergétique sous-transitionnelle à la plage de dépense énergétique aérobie maximale, est défini comme étant caractéristique de « l'endurance ».

$$(9) \quad e = (DE_t - DE_p) / (DE_m - DE_p) = (m-1)/m$$

L'équation générale de « FR_w » en fonction de « DE_w » peut donc s'écrire comme suit :

$$(1)(8)(9) \quad FR_w = FR_p + 1/ER * ((DE_w - DE_p)/(DE_m - DE_p))^{(1/(1-e))}$$

L'incidence de ces deux facteurs est illustrée par les Figures 2 et 3.

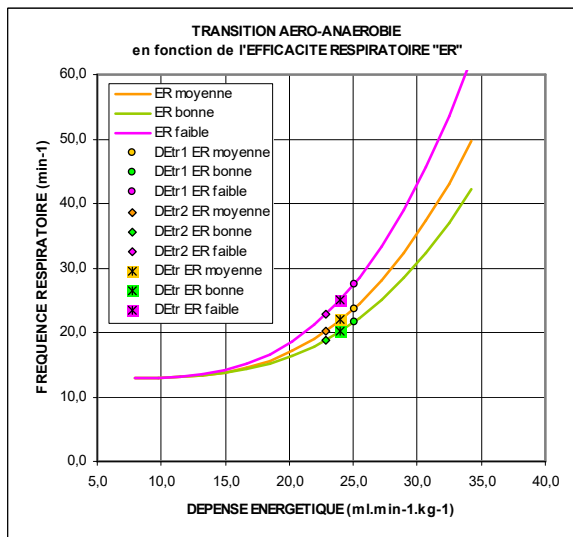


Figure 2

Pour une même aptitude aérobie maximale « DE_m » et une même endurance « e », si l'efficacité respiratoire « ER » diminue, pour un exercice de puissance donnée « °W », la fréquence respiratoire sera plus élevée et vice-versa.

Cette augmentation de FR touche surtout les valeurs observées au maximum aérobie et à un moindre degré celles de transition aéro-anaérobie. L'allure de la courbe représentative n'est en effet affectée que par un coefficient multiplicatif.

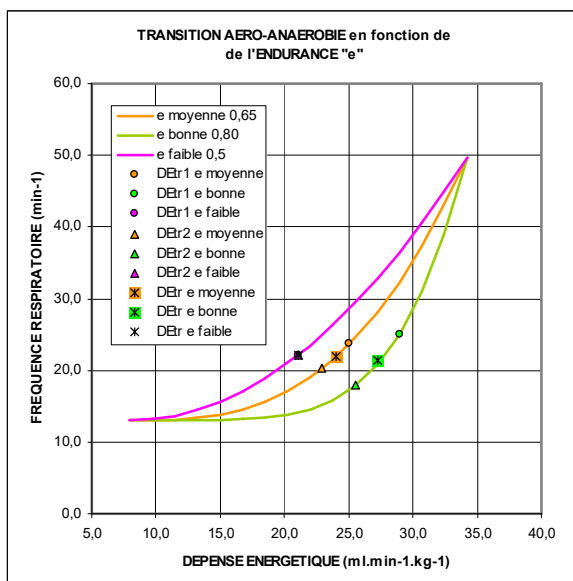


Figure 3

Pour une même aptitude aérobie maximale « DE_m » et une même efficacité respiratoire « ER », si l'endurance « e » est isolément modifiée, pour un exercice de puissance donnée « °W », la fréquence respiratoire caractéristique de la transition « FR_{tr} » reste sensiblement la même ce qui confère à cette grandeur **une importance particulière**.

En revanche cette valeur est atteinte pour des valeurs de « DE_{tr} » différentes, la courbure du graphe représentatif étant d'autant moins accentuée que l'endurance est faible et vice-versa.