BULLETIN SCIENTIFIQUE ASTB N°4/2022

L'ENTRAINEMENT SCIENTIFIQUE INDIVIDUEL

Jean-Paul ECLACHE

Extrait de la 3ième partie

Information

A la suite de l'AG 2022 et à la demande du CSE de l'ASTB (Conseil Scientifique et d'Ethique), le Comité Directeur de l'ASTB a accepté que l'ouvrage de la Collection Performance et Santé publié en 1999 sur « L'entraînement Scientifique Individuel » fasse l'objet d'une nouvelle parution sur le site de l'ASTB.

Avec l'autorisation conjointe de l'éditeur et de l'auteur, ce livre fera donc l'objet, à l'instar de ce qui avait été réalisé en 2003, d'un découpage en quatre Bulletins Scientifiques d'un volume semblable. Ils seront disponibles et en accès libre par périodes de trois mois en principe aux deuxième, troisième et quatrième trimestre 2022 ainsi qu'au premier trimestre 2023.

Ce dernier Bulletin 2022 (n°4) est donc la reproduction sans aucune modification des trois premières parties de l'ouvrage assorties de leurs Figures et de leurs Tableaux. Il sera complété ultérieurement, comme chacun de ces quatre Bulletins, d'un additif écrit par l'auteur ayant pour objet de répondre aux questions des lecteurs. Cet additif intègrera en plus les travaux et les dernières mises à jour publiées ces vingt dernières années sur le thème de l'entraînement et de la rééducation.

Pour en faciliter la lecture, la présentation générale de l'ouvrage, son avant-propos, la Table des Matières, le Lexique et la Bibliographie seront systématiquement joints dans leur intégralité lors de l'édition de chacun de ces quatre Bulletins.

L'ENTRAINEMENT SCIENTIFIQUE INDIVIDUEL

COLLECTION PERFORMANCE ET SANTE septembre 1999

Jean-Paul ECLACHE

L'Entraînement Scientifique Individuel

La clef d'or du mariage performance et santé

COLLECTION PERFORMANCE & SANTE

EDITIONS ASTB

Voici enfin l'ouvrage qu'attendaient les nombreux acteurs de l'entraînement toujours confrontés au 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, ni 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.

Avant-propos

L'entraînement ou action de "préparation" à un sport ou à une compétition (Larousse), relève implicitement du domaine de l'éducation "physique" et des "loisirs" ; il reste donc encore de nos jours très dévalorisé par rapport à l'enseignement "intellectuel" considéré comme noble et obligatoire et donc généralement reconnu et pris en charge par nos sociétés. Cette dichotomie culturelle absurde qui tend à fracturer l'individu en deux sous-ensembles indépendants voire même opposés, le beau et le bien contre le laid et le mal, est l'une des raisons majeures de fragilisation de l'individu et de son exploitation par différentes structures socioculturelles. Comme pour la plupart des secteurs ainsi dévalorisés et qui n'ont que peu ou pas attiré l'intérêt du monde scientifique, le vide laissé par l'absence de culture de base transmise dès le plus jeune âge à chaque individu laisse donc le champ libre à tous les excès et toutes les exploitations des professionnels du "paraître" et du maquillage qui hantent le monde des médias, du "show business" et de la politique. Les conséquences désastreuses de ces déviances, tant en termes de pathologies que de contre-performances, sont vraisemblablement l'une des raisons essentielles qui m'ont poussé à rédiger un ouvrage non conformiste à la fois résolument pratique et scientifique.

Cet ouvrage est la synthèse et l'aboutissement d'un travail de vulgarisation scientifique réalisé pendant plus de vingt ans, non seulement pour les athlètes de haut niveau en listes régionales et nationales ou les cadres techniques et les médecins des Fédérations chargés de leur suivi, mais aussi pour tous les pratiquants, étudiants et enseignants en sciences et techniques des activités physiques et sportives. Il est l'un de ces ouvrages trop rares qui osent tendre une passerelle au-dessus de cette fracture profonde qui sépare la physiologie fondamentale « scientifiquement correcte » de ses applications pratiques « triviales » abandonnées aux vendeurs de recettes. Il ne s'agit pas non plus, comme le font de nombreux ouvrages, de juxtaposer sans aucun lien logique et dans deux parties successives et distinctes la bioénergétique traditionnelle et les recettes empiriques. Il ne s'agit pas non plus, comme l'ont tenté d'autres auteurs, de justifier d'une touche de « scientisme » le recopiage du catalogue impressionnant de toutes les recettes et techniques classiques d'entraînement.

Cet ouvrage est le fruit d'une double démarche d'analyse sans complaisance et de vérification tant des écrits scientifiques de la littérature internationale que de ceux plus pratiques qui parfois s'en inspirent. Il intègre donc les résultats des différents travaux fondamentaux et finalisés réalisés en ce domaine à partir des années 1969 dans le Laboratoire de Physiologie de l'Université Claude Bernard (Lyon 1), dans le Laboratoire d'Exploration Cardio-pulmonaire de l'Hôpital Saint Joseph, dans le Laboratoire de la Performance de l'ASTB, en particulier ceux réalisés pour la Préparation Olympique et le Ministère de la Jeunesse et des Sports entre 1987 et

1992, ainsi que ceux de la Section Aptitude Physique et du Laboratoire de Biologie de l'Exercice Physique du CRSSA pour le Ministère de la Défense. Il intègre aussi, bien évidemment, les nombreuses expériences pratiques validant le bien-fondé des principes et règles de préparation édictés par l'ASTB et mis en œuvre par le Laboratoire de la Performance. La réussite systématique « visible » des différentes équipes et athlètes engagés individuellement ou collectivement dans les compétitions et les records de niveau mondial préparés par ce Laboratoire a quelque peu occulté une réussite moins médiatique mais probablement beaucoup plus importante : d'une part une très forte réduction de la pathologie traumatique associée à une longévité accrue pour les pratiquants de haut niveau et, à l'opposé, une optimisation de la rééducation du potentiel physiologique des sujets défavorisés par une enzymopathie, une transplantation ou simplement un « sédentarisme » habituel ou accidentel.

Après un premier chapitre consacré à l'analyse synthétique des principales distorsions affectant l'entraînement traditionnel, qu'il soit de fondement empirique ou scientifique, et qui conduisent chaque année un fort pourcentage de sportifs dans les consultations médicales spécialisées, nous redéfinirons dans un second chapitre les principes et objectifs modernes d'un entraînement susceptible de satisfaire aux **deux objectifs complémentaires de réduction de la pathologie et d'optimisation des performances**. Le troisième chapitre est consacré à la présentation des techniques modernes d'entraînement et à son adaptation lors des phases d'activités critiques imposées par les rythmes compétitifs. Le dernier est une présentation des aspects concrets de la planification de l'entraînement : il comporte un rappel des techniques d'analyse et de suivi tels qu'ils furent réalisés par le Laboratoire de la Performance aussi bien pour la préparation des athlètes et équipes nationales ayant atteint les plus hautes marches de la hiérarchie internationale que pour celle des sujets moins favorisés par les hasards de la vie et de la génétique.

A cette occasion il m'apparaît indispensable de remercier tous les sportifs et cadres techniques qui, les premiers, ont eu le courage de se remettre en cause en acceptant de soumettre à l'analyse scientifique leurs propres entraînements et/ou ceux qui leur étaient proposés : en particulier et par ordre chronologique, les équipes de football de l'O.L. avec A. JACQUET, les athlètes de canoë-kayak du CK La Mulatière avec M. DOUX, les équipes de basket de l'ASVEL avec G. VIALATON, les équipes de ski nordique et de biathlon de l'EMHM avec J. GRANDCLEMENT, les gymnastes de La Grenobloise avec M. GANZIN, sans oublier bien évidemment tous ceux des différents clubs régionaux ou équipes nationales qui ont suivi, tant dans ces disciplines que dans d'autres comme : athlétisme, aviron, boules, cyclisme, gymnastique, handisport, natation, rugby, tir, etc.

TABLE DES MATIERES

Première partie

L'ENTRAÎNEMENT TRADITIONNEL ET SES DISTORSIONS

1- QUELQUES DERIVES DE L'ENTRAINEMENT DIT EMPIRIQUE
11-L'entraînement cycloïde
12-L'entraînement poker
13-L'entraînement surhomme
14-L'entrainement plagiat
15-L'entraînement tiroir

2- QUELQUES DERIVES DE L'ENTRAINEMENT DIT SCIENTIFIQUE
21-Le tout biochimique
22-Le modèle des filières
23-L'histoire des filières
24-La recette des filières

Deuxième partie

OBJECTIS ET PRINCIPE DE L'ENTRAINEMENT MODERNE

1- OBJECTIFS DE L'ENTRAINEMENT
11-Aptitude biochimique
12-Aptitude biomécanique

2- PRINCIPE DE L'ENTRAINEMENT
21-Origine de l'induction enzymatique
22-Expression de l'induction enzymatique

Troisième partie

TECHNIQUES D'ENTRAINEMENT MODERNE

1- ENTRAINEMENT BIOCHIMIQUE
11-Objectif
Les adaptations structurales des effecteurs biochimiques
Les adaptations fonctionnelles des effecteurs biochimiques
Les adaptations du système de commande et régulation autonomes
Les facteurs influençant le potentiel d'adaptation individuelle
12-Caractéristiques dimensionnelles et physiques de la séance
L'importance de la masse musculaire sollicitée
Les activités locales et les activités globales
13-Caractéristiques cinématiques et énergétiques de la séance
La puissance de la séance
La durée de la séance

2- ENTRAINEMENT BIOMECANIQUE
21-Objectif
Les adaptations du système de commande et régulation volontaires
Les adaptations fonctionnelles des effecteurs biomécaniques
Les adaptations structurales des effecteurs biomécaniques
22-Caractéristiques dimensionnelles et physiques de la séance
Les masses actives et les masses mobilisées
L'environnement physique
Les interfaces
23-Caractéristiques cinématiques et énergétiques de la séance
La réduction mixte des intensités et des temps
La réduction prédominante des intensités
La réduction prédominante des temps

3- ENTRAINEMENT COMPLEMENTAIRE
31-Transitions repos activités
L'échauffement
La récupération
32-Activités critiques
La musculation
Les stages, sélections et compétitions
33-Intégration scientifique, biologique et technique
La connaissance facteur de performance
Le contenu de la formation

Quatrième partie

PLANIFICATION DE L'ENTRAINEMENT MODERNE

1-TECHNIQUES DE QUANTIFICATION DE L'ENTRAINEMENT

11-Quantification de l'astreinte à partir des contraintes mécaniques

Les grandeurs mécaniques caractéristiques des contraintes

Les relations entre grandeurs mécaniques et astreinte

12-Quantification directe de l'astreinte biologique

Les grandeurs biologiques caractéristiques de l'astreinte

Les relations entre grandeurs biologiques et astreinte

13-Enregistrement et analyse de l'entraînement

Le répertoire des principales séances d'entraînement

Le répertoire des activités fondamentales

La fiche de séance principale

La fiche de planification annuelle

La fiche d'entraînement quotidien

2-SUIVI DES EFFETS BIOENERGETIQUES DE L'ENTRAINEMENT

21-Aptitude biochimique

La mesure de la consommation maximale d'oxygène en laboratoire

Le suivi de la consommation maximale d'oxygène sur le terrain

La mesure de la transition aérobie-anaérobie sur le terrain

La mesure des cinétiques et capacités énergétiques

22-Aptitude biomécanique

La mesure de l'efficacité normale sur le terrain

La mesure de l'efficacité optimale absolue en laboratoire

La mesure de l'efficacité optimale relative

3-ORGANISATION TEMPORELLE DE L'ENTRAINEMENT

31-Codification des séances d'entraînement

Le type de la séance

L'intensité de la séance

La durée de la séance

32-Entretien bioénergétique de fond

L'entretien biochimique

L'entretien biomécanique

33-Adaptations aux phases critiques

Les phases de surcharge

Les phases de reprise

Les phases de replanification

Annexe1 : BIBLIOGRAPHIE

Annexe 2 : LEXIQUE

Troisième partie

TECHNIQUES D'ENTRAINEMENT MODERNE

L'entraînement consistera donc à tenter, pour tout individu et quelle que soit la discipline pratiquée, **d'optimiser et d'entretenir de façon durable l'expression du potentiel génétique individue**l, grâce à une activité dont l'intensité en fonction du temps occasionne l'induction enzymatique maximale sans créer de lésions cellulaires irréversibles et/ou une accélération des processus de vieillissement. De façon à simplifier l'exposé de cette question nous envisagerons d'abord l'entraînement en fonction des deux grands domaines d'impacts recherchés sur les fonctions "biochimiques" générales et "biomécaniques" particulières. Nous verrons ensuite les problèmes liés aux phases de transition (échauffement, récupération) ou de surcharge (musculation, stages, compétitions).

1- ENTRAINEMENT « BIOCHIMIQUE »

L'aptitude "biochimique" se caractérise donc par le potentiel à fabriquer de l'ATP à partir des carburants primaires, essentiellement lipides et glucides, et du comburant, l'oxygène (Fig. 15). L'aptitude sera donc d'autant plus élevée que le **débit d'ATP disponible** sera élevé en état stable ; mais cette qualité première qui fait référence à un critère de « **puissance »** de la machine humaine doit être obligatoirement précisée par deux notions complémentaires : la rapidité d'adaptation de ce débit lors d'une variation brusque des besoins énergétiques, notion d'adaptabilité énergétique, d'aptitude aux « **reprises** », ou de potentiel métabolique d'accélération-décélération, et lors d'un allongement temporel marqué de l'activité, notion de capacité énergétique, d'aptitude à durer, « **endurance** », ou potentiel du réservoir à stocker-déstocker les réserves énergétiques.

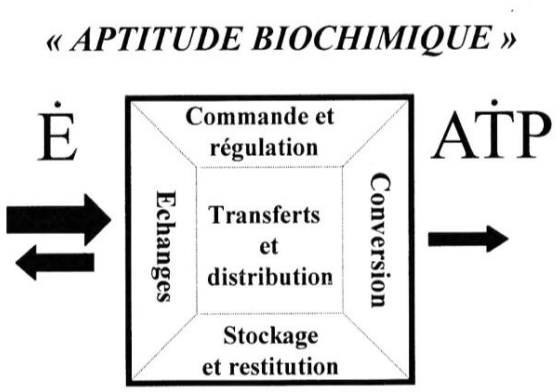


Figure 15. *L'Aptitude Biochimique comme l'Aptitude Biomécanique est sous-tendue par cinq fonctions bioénergétiques essentielles.*

11- OBJECTIF

L'objectif est donc d'obtenir pour l'ensemble des structures et fonctions individuelles **la chaîne de transfert énergétique la plus efficace** possible tant dans les phases cataboliques d'activité qu'anaboliques de récupération. Ce qui implique en d'autres termes d'optimiser les structures et les fonctions des échangeurs, celles des territoires de stockage et de restitution des réserves énergétiques, le transport et la distribution cardiocirculatoire, les échanges et le raffinage musculaire. Comme nous le verrons par la suite, l'intensité et la rapidité de ces améliorations sont étroitement dépendantes des caractéristiques de l'entraînement, en particulier du niveau d'intensité des séances, de leur durée et de leur rythmicité dans la semaine (Fig. 16).
Mais il est remarquable de constater que ce qui caractérise les sujets bénéficiant d'un très fort potentiel biochimique et d'un bon entraînement "global" et "foncier" a en général beaucoup plus de traductions **fonctionnelles** que dimensionnelles et, a fortiori, que l'image ou la plastique corporelle statique. Ces adaptations s'observent donc classiquement chez les athlètes pratiquant des disciplines où le fond prédomine, ski de fond, courses de fond, patinage de vitesse, cyclisme sur route, orientation, mais aussi chez les patients dont les séances de rééducation respectent les principes fondamentaux de ce type d'entraînement.

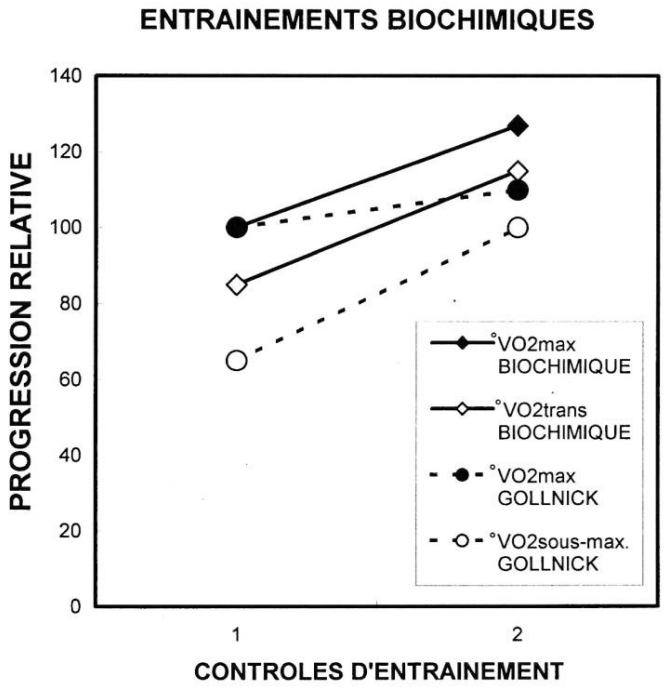


Figure 16. *L'amélioration de l'ensemble des structures supportant la fonction de transfert et de transformation d'énergie chimique se traduit par une augmentation de °VO2max. et de °VO2trans. La réalisation 2 à 3 fois par semaine de séances exhaustives à la puissance de transition s'accompagne, pour ces deux valeurs, d'une élévation parallèle supérieure à celle d'entraînements de puissance plus faible et de durée plus courte.*

Les adaptations structurales des effecteurs biochimiques

Les dimensions corporelles, les masses ou les volumes apparaissent donc relativement peu affectés. Si la section des cellules musculaires peut présenter une augmentation sensible, en revanche, leur nombre n'est pas modifié ; mais l'augmentation de la masse protoplasmique active est souvent masquée par une réduction favorable des réserves adipeuses. Les volumes pulmonaires et cardio-circulatoires sont sensiblement augmentés. La vascularisation cutanée et les glandes sudoripares se développent. Le nombre de capillaires et de mitochondries musculaires s'accroît. La concentration des enzymes musculaires impliqués tant dans les transports membranaires de carburants et déchets que dans leur utilisation à des fins de resynthèse de l'ATP augmente : citons par exemple pour la glycolyse l'élévation de la PFK (phosphofructokinase), ou de certains enzymes du cycle tricarboxylique de Krebs, la SDH (succino-déshydrogénase), ou de la chaîne respiratoire tels que la cytochrome oxydase. Cette augmentation de potentiel oxydatif peut affecter aussi bien les fibres ST (Slow twitch ou fibres à contraction lente) que FT (Fast twitch ou fibres à contraction rapide) avec une propension générale à voir le pourcentage de fibres ST augmenter et FTb baisser (catégorie de fibres rapides à métabolisme anaérobie prédominant).

Les transformations subies par tous les effecteurs à finalité « biochimique » (Tableau 2) vont dans le sens d'une **facilitation spatiale** des transformations et transferts du comburant, des carburants et des déchets.

Les adaptations fonctionnelles des effecteurs biochimiques

Mais ce qui est de loin le plus marquant au-delà de ces modifications structurales, corporelles, organiques ou moléculaires, qui tendent à réduire la distance de diffusion des éléments énergétiques, ce sont les modifications fonctionnelles conférant à ces différentes structures la possibilité d'améliorer de façon considérable l'intensité, l'adaptabilité, et la réduction de durée des transferts entre les différents territoires fonctionnels.

L'intérêt par exemple de posséder d'importantes réserves hépatiques et musculaires de glycogène est couplé à celui d'une plus forte disponibilité et rapidité de restauration liée aux adaptations enzymatiques et membranaires. Les réserves adipeuses quantitativement moins importantes sont en réalité beaucoup plus disponibles du fait d'une concentration et d'une activation de la lipase tissulaire beaucoup plus marquée ; cette meilleure oxydation des lipides et l'élévation du citrate tendent à freiner l'activité de la PFK et donc la glycolyse (Fig. 17).

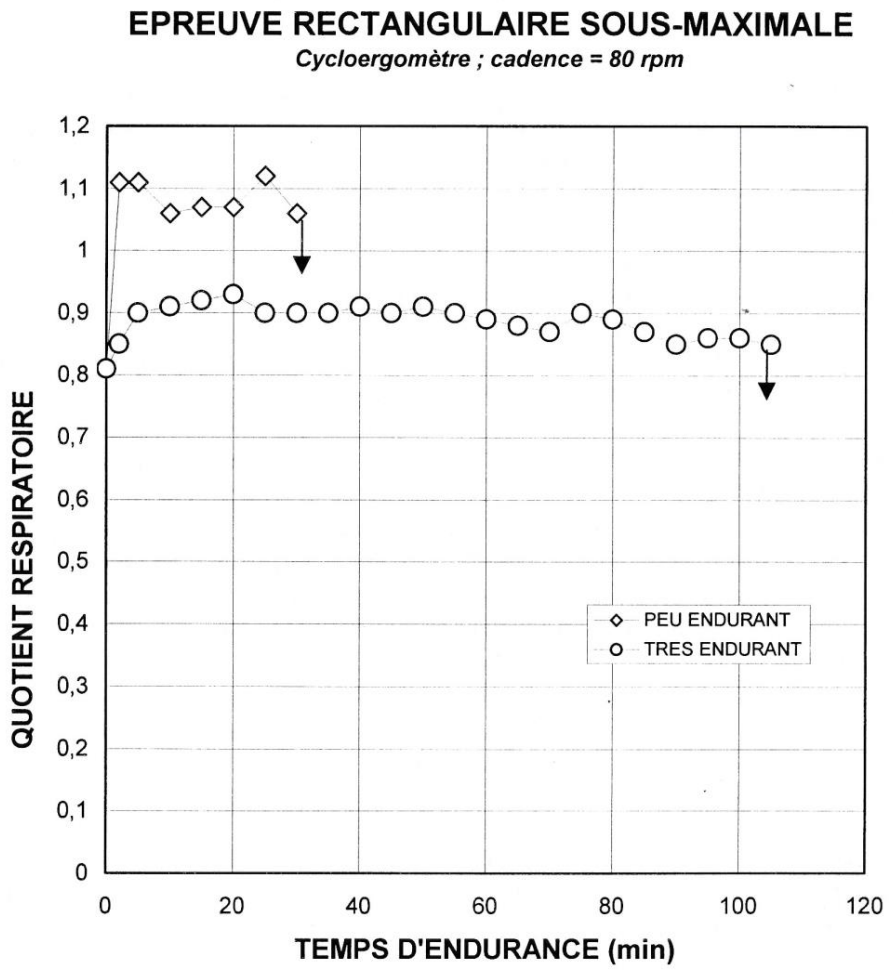


Figure 17. *Pour un même exercice réalisé avant et après un entraînement biochimique, la réduction marquée de quotient respiratoire (QR) et l'augmentation marquée du temps d'endurance traduisent l'amélioration de tous les processus enzymatiques de transfert et d'utilisation des graisses. La conséquence directe en est une amélioration du rendement de l'activité du fait d'une participation anaérobie et d'une utilisation des glucides plus faible.*

Par voie de conséquence, à puissance absolue ou relative équivalente, la production de lactate, de protons et de radicaux libres est moindre, leur rapidité d'élimination et de métabolisation supérieure. (Fig. 18).

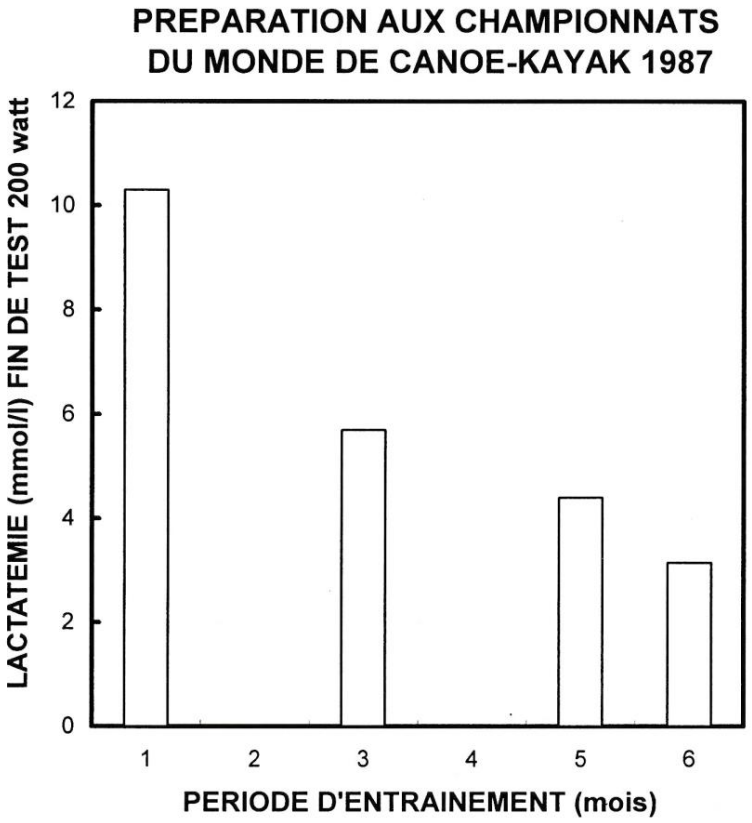


Figure 18. *Pour un exercice de même puissance réalisé à plusieurs reprises chez un athlète en équipe de France de canoë-kayak en préparation aux Championnats du monde, la lactatémie de fin d'épreuve est d'autant plus basse que le nombre de mois d'entraînement de type biochimique est élevé.*

Cette amélioration de la « combustion » des « carburants » au profit de l'utilisation des lipides se voit aussi bien chez les athlètes de haut niveau que chez les patients en phase de rééducation ou de réadaptation pourvu que les caractéristiques des séances d'entraînement respectent les mêmes règles relatives concernant en particulier une puissance d'entraînement proche de la transition aéro-anaérobie individuelle (Fig. 19).

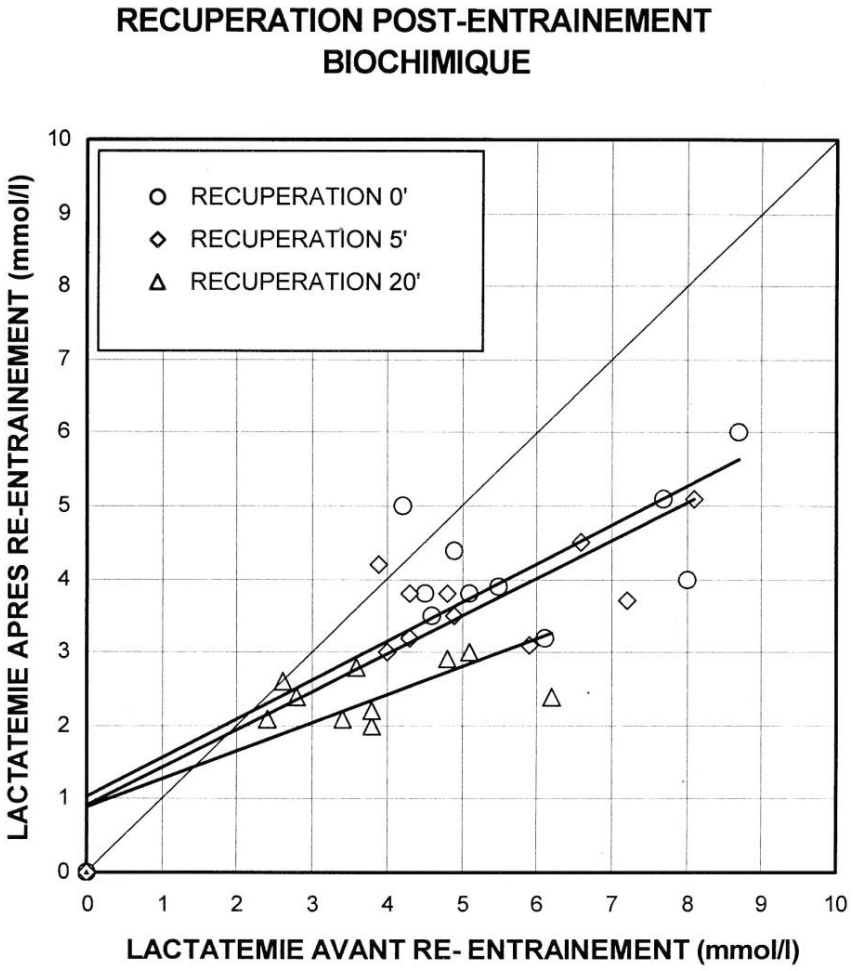


Figure 19. *Pour un exercice de même puissance, réalisé avant et après ré-entraînement d'une population de douze sédentaires de 43 ans de moyenne d'âge, à raison de 1 à 2 séances d'une heure d'entraînement biochimique par semaine, les lactatémies de fin d'épreuve (0) et de récupération (5'et 20') sont abaissées après entraînement.*

Ces améliorations métaboliques sont accompagnées par de nombreuses améliorations cardio-respiratoires : la diffusion alvéolo-capillaire est améliorée, les inégalités ventilation-perfusion réduites ; le débit cardiaque à fréquence identique est plus conséquent du fait d'une puissance contractile plus élevée et d'une meilleure vidange systolique ; cette évolution se traduit généralement par une forte élévation du débit cardiaque maximal en dépit d'une réduction de la fréquence cardiaque maximale ; l'extraction tissulaire en oxygène est plus efficace, la différence artério-veineuse plus importante, l'élimination d'eau et d'anhydride carbonique plus rapide, ce qui permet, en dépit d'une sudation plus élevée et plus rapide mais moins spoliante sur le plan ionique, de moins affecter le volume plasmatique circulant (Fig. 20).

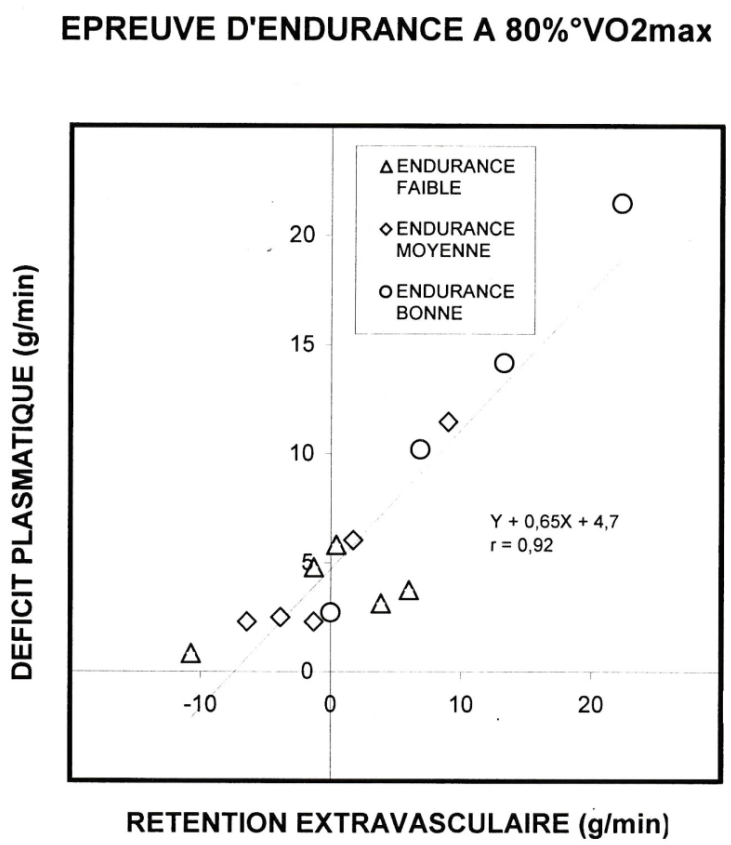


Figure 20. *La réalisation d'un exercice de puissance voisine de 80 % de °VO2max. se traduit par un déficit plasmatique d'autant plus important que la lenteur de transfert et la rétention d'eau métabolique des masses musculaires actives est élevée. Ce phénomène est plus marqué chez les sujets " peu " □ , que " moyennement " △ , ou " très endurants " ○ ; il est en partie lié à une participation supérieure du métabolisme anaérobie et au pouvoir osmotique de l'ion lactate produit en plus grande quantité.*

En conclusion, les transformations subies par tous les effecteurs à finalité « biochimique », cf. pour mémoire le Tableau 2, vont dans le sens d'une **facilitation temporelle** (accélération) des transformations et transferts des carburants, du comburant et des déchets.

Les adaptations du système de commande et de régulation autonomes

Ces différentes modifications structurales et fonctionnelles liées à l'induction enzymatique de l'entraînement sont induites et accompagnées bien évidemment d'un remaniement de la commande et des régulations neuroendocriniennes autonomes. L'évolution générale globale du système de commande est une bascule du système sympathique au profit du **système parasympathique**. Le remaniement du nombre et de la sensibilité des récepteurs périphériques aux messagers sympathiques en particulier, permet à charge absolue et relative équivalente une moindre activité sympathique pour un résultat très supérieur en termes d'adaptations. Ce nouvel équilibre est d'autant plus intéressant qu'il va dans le sens d'une économie et d'une efficacité supérieures pour l'ensemble des structures impliquées dans l'aptitude "biochimique", et pour une contrainte identique, par exemple une tension artérielle moins élevée et une fréquence cardiaque plus faible (Fig. 21).

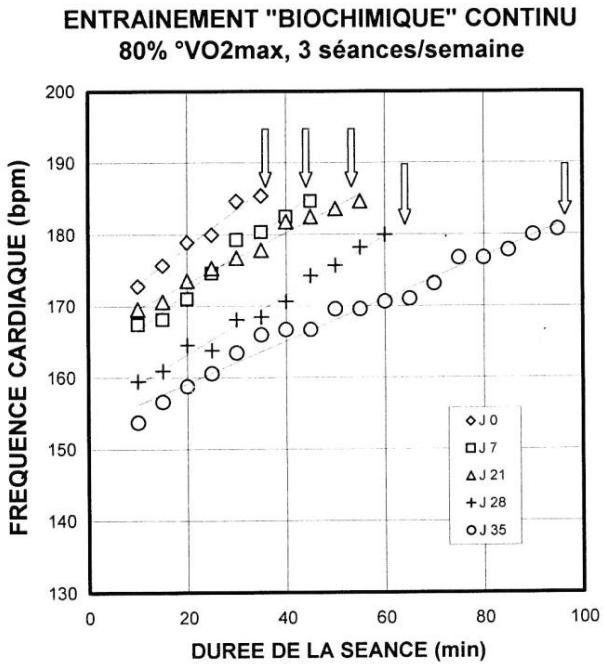


Figure 21. *Pour un exercice de même puissance, l'entraînement biochimique, réalisé trois fois par semaine, s'accompagne d'une réduction progressive de la stimulation sympathique et d'une amélioration de l'éjection systolique avec diminution corollaire de la fréquence cardiaque. Bien que la fréquence cardiaque maximale ait baissé de plus de dix battements par minute, la durée d'épuisement et d'atteinte de FCmax passe de 30 minutes à plus de 90 minutes.*

Les modifications induites par ce type d'entraînement trouvent donc différentes applications fondamentales non seulement dans le sport de haut niveau, mais aussi dans la rééducation ou le traitement de plusieurs pathologies de nos sociétés sédentarisées et stressées, surcharge pondérale, dysrégulations cardiocirculatoires, hypertensions labiles, dystonies neurovégétatives, mais aussi certaines affections psychiatriques (Fig. 22).

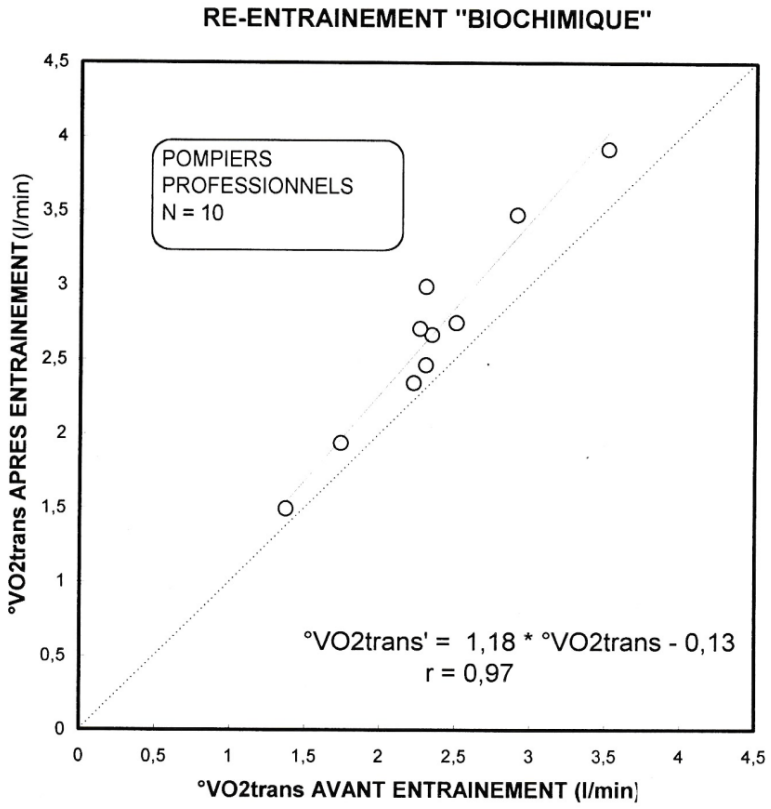


Figure 22. *L'amélioration de la transition aéro-anaérobie d'une population de sédentaires en rééducation grâce à un entraînement biochimique de trois mois est paradoxalement plus marquée chez les sujets préalablement plus aptes. Ce phénomène est en réalité lié à une simple participation effective plus rigoureuse au programme de ré-entraînement proposé.*

Les transformations subies par le système de commande et de régulation de la machine humaine (Tableau 1) vont donc dans le sens d'une réduction de l'activité sympathique et donc d'une **économie générale** des effecteurs.

Facteurs influençant le potentiel d'adaptation individuel

Le descriptif des caractéristiques « idéales » décrites ci-dessus ne doit pas faire oublier que de telles adaptations sont le résultat cumulé de processus de sélection et d'entraînement. Le potentiel observable à un moment donné est donc toujours la résultante d'un potentiel génétique inné dont l'expression est modulée selon les expériences vécues ou potentiel acquis. Ces deux groupes de facteurs sont à l'origine d'inégalités d'adaptation aussi bien entre différents individus qu'entre différents tissus d'un même individu.

Le temps de réponse des modifications induites par l'entraînement est différent selon le niveau de complexité structurale auquel on s'adresse ; il varie aussi d'un tissu à un autre en fonction du potentiel de renouvellement cellulaire qui lui est propre. Lorsqu'il s'agit d'adaptations moléculaires telles que par exemple celles des enzymes de la glycolyse, la rapidité de leur turn-over et de leur demi-vie autorise des évolutions importantes en quelques jours ; celle des structures tissulaires plus complexes nécessitent en revanche plusieurs semaines (mitochondries, tampons), ou plusieurs mois (néo-capillaires), voire plusieurs années (myocarde). Une modification cellulaire périphérique ne sera donc suivie de modification des témoins pertinents de l'aptitude "biochimique" comme **V̊O2max** que de façon amortie et déphasée (Fig. 23).

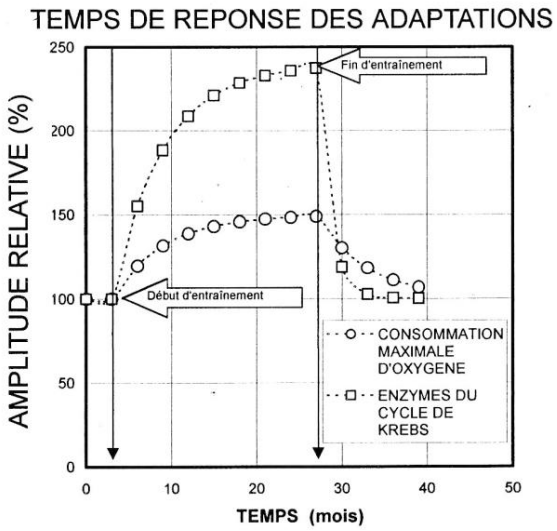


Figure 23. *Lors des phases transitoires d'amélioration ou de réduction d'aptitude liées à la reprise ou à l'interruption de l'entraînement, l'évolution d'un témoin global d'aptitude biochimique comme °VO2max. est amortie et déphasée par rapport à celle des enzymes du métabolisme aérobie des cellules musculaires sollicitées.*

Ceci complique encore plus le problème de planification posé par l'entraînement "poker" puisque lors de l'affûtage final d'optimisation "technique", souvent délétère tant sur le plan cellulaire périphérique que sur le plan neuroendocrinien, aucun test ne paraît suffisamment précis pour mettre en évidence l'amorce de fléchissement métabolique qui se poursuivra ensuite pendant plusieurs semaines !

L'amplitude des modifications est donc elle-même dépendante du type de structure envisagée. Mais elle est aussi très dépendante du vieillissement cellulaire dont l'un des effets est de réduire progressivement cette plasticité. La réduction moyenne du potentiel aérobie maximal en fonction de l'âge en est l'une des traductions classiques ; mais ce qui est aussi marquant, c'est la réduction des limites d'aptitude des différentes classes d'âge (Fig.24).

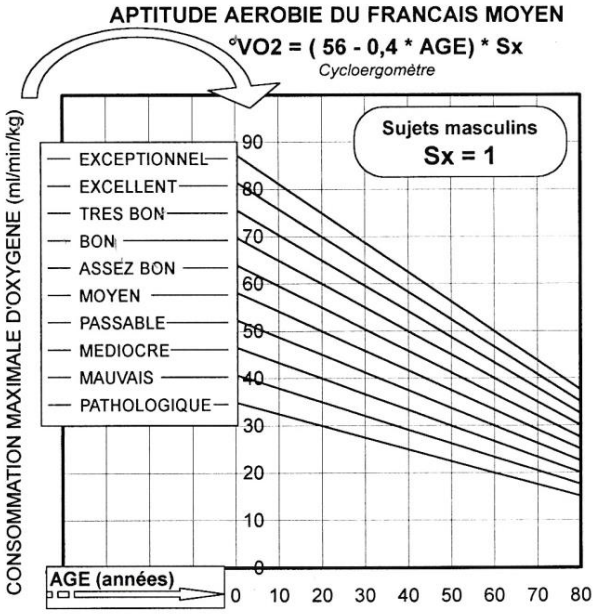


Figure 24.
Le potentiel énergétique aérobie du Français moyen ramené au kilogramme de poids corporel, (°VO2 exprimé en ml/min/kg) diminue régulièrement selon l'équation :
°VO2 = (56 - 0.4 x âge) x Sx.
Le facteur Sx est égal à 1 pour les hommes et 0.85 pour les femmes.
Ces statistiques réalisées en 80 sont proches des valeurs obtenues par Flandrois vingt ans auparavant ; elles semblent encore très proches à l'aube de l'an 2000.

Le maintien prolongé d'une activité foncière joue un rôle très favorable sur ces deux paramètres. En revanche l'accumulation de micro et macro-traumatismes répétitifs accélère les processus de vieillissement cellulaire et réduit le potentiel adaptatif. Il faut enfin bien considérer que, dans l'amplitude des variations induites par un nouveau plan d'entraînement, interviennent de façon primordiale le niveau d'activité et la qualité de l'entraînement suivis auparavant : si celui-ci était déjà idéal, il ne pourra y avoir de progression ; en revanche, si le sujet sort d'une phase de quelques mois ou quelques semaines de réduction d'activité ou d'immobilisation , l'adaptation peut être considérable.

12- CARACTERISTIQUES DIMENSIONNELLES DE LA SEANCE

L'importance de la masse musculaire sollicitée

Le fait de privilégier la **globalité de la masse active** de l'individu par rapport au seul groupe musculaire dit "utile" impliqué par l'activité sportive repose sur plusieurs raisons biologiques fondamentales : les structures et fonctions générales de transfert des carburants primaires, d'oxygène et des déchets métaboliques (eau, anhydride carbonique, calories, protons...) ainsi que les structures neuroendocriniennes qui les commandent et les régulent, ne subissent une stimulation optimale et donc un développement correspondant que au-delà d'une masse musculaire active supérieure à environ 50% de la masse musculaire totale. C'est cette raison qui nous a conduit dans les différentes disciplines sportives sollicitant une masse insuffisante à promouvoir une pratique importante dans d'autres activités plus globales : cette stratégie fut mise en place dans toutes les équipes dont nous avions la charge, en particulier les équipes de France de canoë-kayak en eaux vives à partir des années 80 et pendant toute la décennie qui suivit (Fig. 25).

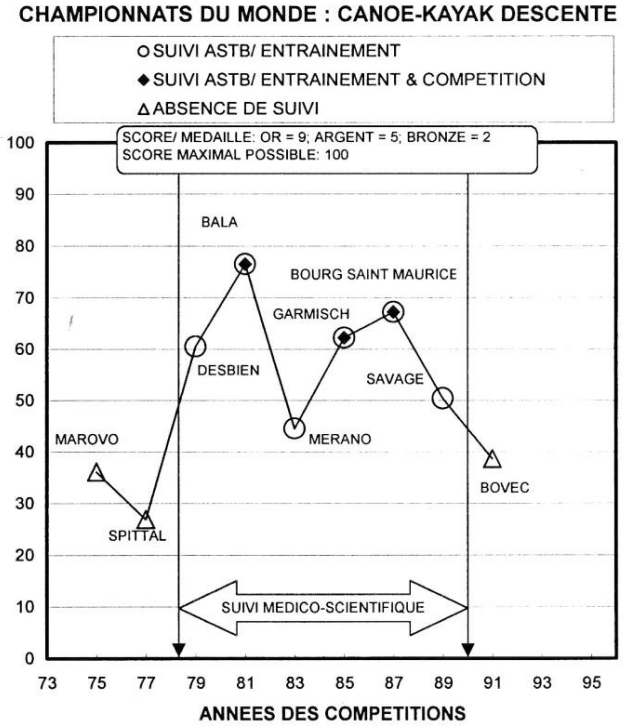


Figure 25. *La préparation et le suivi scientifiques sont des facteurs très importants de la réussite sportive. La décennie correspondant à un dévelop--pement considérable de la recherche à la F.F.C.K. a été marquée par une domination mondiale exceptionnelle.*
Le niveau moyen de réussite internationale est encore plus élevé si la préparation se complète d'une analyse des facteurs environnementaux, matériels, techniques et tactiques sur le lieu même de compétition comme à BALA, GARMISCH et BOURG SAINT MAURICE.

C'est pendant cette même période d'ascension et de domination mondiale des compétitions par les athlètes des équipes de France que fut mise en place une même stratégie à disposition de différents grands clubs régionaux, en particulier de sports collectifs comme le football, le basket ou le rugby, pour lesquels les évaluations avaient mis en évidence des déficiences énergétiques évidentes par rapport au niveau international des meilleurs.

C'est aussi ce type d'entraînement qui fut mis en place par le Laboratoire de la Performance pour servir de base à la préparation et à la réussite des athlètes qui ont fait tomber les records référencés au Tableau 3. Ce type d'entraînement doit bien évidemment être mené simultanément pour les groupes musculaires spécifiques de la discipline sportive, dans l'optique de développer parallèlement et sans déphasage les potentiels biochimiques local et central. La proportion relative de travail spécifique respectée est d'environ 50% corrigée en fonction des écarts observés entre **V̊O2max**. théorique spécifique et **V̊O2max**. spécifique réel (Fig. 26).

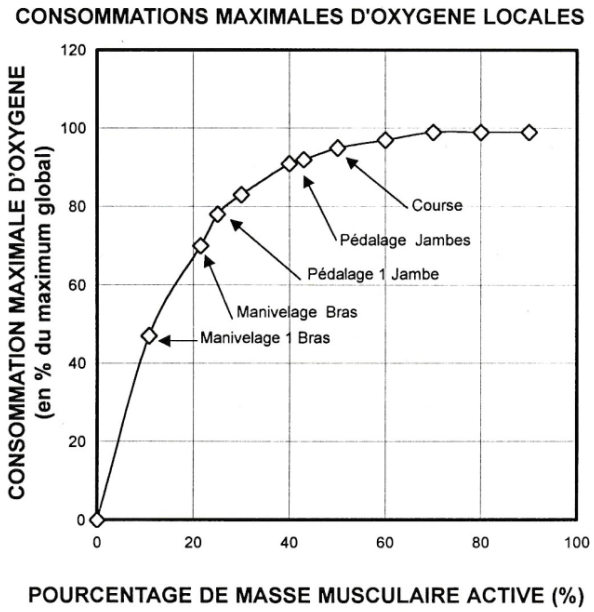


Figure 26. *La consommation maximale d'oxygène est dépendante de la masse musculaire mise en jeu. L'expression de °VO2m ramené à sa limite théorique idéale °VO2mt répond à une loi exponentielle du type :*

$$°VO2m/°VO2mt = 1 - e^{-6.MMt}$$

Le pourcentage d'entraînement biochimique local par rapport à l'entraînement biochimique total est d'environ 50 % ; ce pourcentage sera augmenté ou réduit selon que °VO2max. local est inférieur ou supérieur à cette référence théorique.

Les activités locales et les activités globales

Les disciplines sportives que l'on peut catégoriser de "locales" sont en particulier celles dont les déplacements corporels n'impliquent pas les membres inférieurs de façon dynamique. Les activités sportives classiques susceptibles de mettre en jeu une masse musculaire suffisante sont donc à sélectionner dans les activités impliquant des déplacements importants du centre de gravité de l'individu (définis comme des « mouvements »), associé à des déplacements des centres de gravité de tous les membres (définis comme des « gestes »), donc au minimum des membres inférieurs.

La **locomotion**, marche ou course selon le niveau, est donc à ce titre une activité particulièrement intéressante puisque son apprentissage s'est fait naturellement durant les premières années de l'existence. Il n'est cependant pas inutile de rappeler que, dans cette activité, lors de la percussion du talon sur le sol, une onde de choc se transmet via les chaînons ostéoarticulaires à l'ensemble des structures corporelles. L'amplitude des vibrations ainsi transmises dépend bien évidemment des caractéristiques mécaniques des structures corporelles, mais aussi de celles du sol ou du terrain utilisé et de celles des chaussures, en particulier de la semelle. Les conséquences traumatiques, vasculaires et inflammatoires éventuelles, tendinites, périostites, fractures de fatigue, imposent donc de surveiller attentivement ces équipements sur lesquels il est généralement possible d'intervenir facilement. D'autres activités permettent d'obtenir une sollicitation soit plus marquée, comme le ski de fond ou le biathlon, du fait d'une propulsion associée des membres inférieurs et supérieurs, soit comparable comme le patinage de vitesse, soit légèrement plus faible comme le cyclisme du fait d'une limitation exclusive de la propulsion aux membres inférieurs et un travail postural et d'équilibration moindre ; leur avantage réside cependant dans une évolution sinusoïdale et d'amplitude inférieure des forces développées et l'absence d'onde de choc ; en revanche elles nécessitent un apprentissage technique. La natation présente elle aussi des caractéristiques comparables avec une difficulté technique complémentaire due au milieu aquatique et une propulsion mettant en jeu de façon plus importante les membres supérieurs. Les autres sports aquatiques qui se caractérisent par une propulsion des membres supérieurs, dominante (aviron) ou exclusive (canoë-kayak), ne peuvent donc être intégrés dans cette catégorie des activités globales.

Estimation sommaire de la masse musculaire active

1) La masse musculaire Mm représente environ 43% de la masse corporelle Mc mobilisée correspondante : Mm ≈ 0.43 x Mc.

2) La masse des différents segments corporels mobilisables peut être déduite simplement du modèle cylindrique à partir d'une dimension, de la taille par exemple, mais aussi d'un volume ou d'un poids (Fig. 27).

1) La masse musculaire tronculaire et des ceintures impliquée représente :

- dans les gestes environ 30% de celle des segments mobilisés,

- dans les mouvements environ 50% de celle des segments mobilisés.

EXEMPLE

Sujet de poids Mt = 70 kg ; masse musculaire totale Mm ≈ 70 x 0.43 ≈ 30 kg

Activité de course : Masse des membres inférieurs Mi ≈ 0.33 x 70 ≈ 23 kg

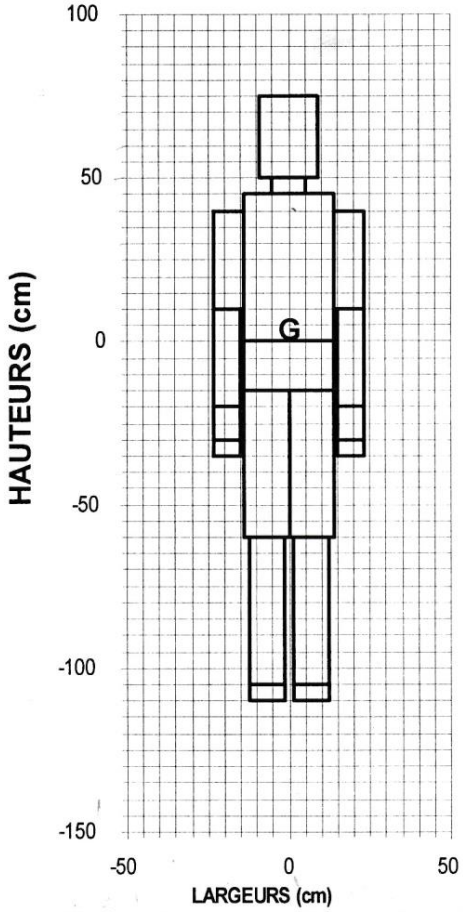
Masse musculaire des MI : Mmi ≈ Mi x 0.43 ≈ 10kg

Masse musculaire mobilisée à la course ≈ Mmi x 1.5 ≈ 15 kg

Conclusion : la masse musculaire active, lors de la course, représente environ 50% de la masse musculaire totale, 15 kg / 30 kg.

MODELE " ASTRABIO "

DEBOUT DE FACE



IDENTIFICATION
Âge = 20 ans;Taille = 1,80 m
Poids = 80 kg; Surface = 2 m2

APTITUDE BIOENERGETIQUE (Jambes)

Débits
°VO2 max. = 50 ml/min/kg
°VO2 trans = 40 ml/min/kg
Cinétiques
TO2 = 60", TL = 200'
TGO = 3", TA = 0,5"

Capacités
VO2 (o,8) = 300 l = 1500 kcal
[ATP] = 0,5 kcal; [PCr] = 2 kcal
[Glycogene] = 1500 kcal
[Acides gras] = 1500 kcal

MODE D'EMPLOI

Biométrique
1) Introduire les mensurations
2) Calcul du coefficient de proportionnalité
3) Affichage de la biométrie pondérée

Bioénergétique
1) Introduire les caractéristiques connues
2) Affichage des caractéristiques estimées
3) Sélectionner l'activité à analyser
4) Affichage des résultats numériques et graphiques.

Références
Masse totale idéale
MTI(Eclache) = [12,7+ 0,05*(A-20)]*T^3 ~ 80,4 kg
Surface corporelle
S(Dubois) = M^0,425*T^0,725*0,007184 ~ 2,04 m2

SEGMENTS	Distances (cm)		Surfaces (cm2)				Volumes	Poids
corporels	Diamètres	Hauteurs	Sections	Projec. F.	Révol.	Externe	(l)	(kg)
tête	18	25	254	450	1414	1414	6,36	6,74
cou	10	5	79	50	157	157	0,39	0,42
tronc	28	45	616	1260	3958	3958	27,71	29,37
2 bras	9	30	127	540	1696	1696	3,82	4,05
2 avant-bras	8	30	101	480	1508	1508	3,02	3,20
2mains	8	15	101	240	754	754	1,51	1,60
bassin	28	15	616	420	1319	1319	9,24	9,79
2 cuisses	14	45	308	1260	3958	3958	13,85	14,69
2jambes	11	45	190	990	3110	3110	8,55	9,07
2pieds	11	5	190	110	346	346	0,95	1,01
TOTAL		185	2581	5800	18221	18221	75,40	79,92

Figure 27. *Modèle anthropométrique cylindrique défini pour un homme de 1,85 m. G représente la position du centre de gravité du modèle.*

13- CARACTERISTIQUES CINEMATIQUES ET ENERGETIQUES

L'objectif de la phase active catabolique d'entraînement est donc de maintenir le pool énergétique le plus bas possible et le plus longtemps possible sans créer de désordre métabolique susceptible de conduire à des lésions cellulaires (Fig. 11). Si l'on fait abstraction des problèmes d'efficacité énergétique liée au choix d'une association particulière couple-cadence, deux grandeurs doivent être parfaitement définies : la puissance moyenne développée et la durée.

La puissance de la séance

La puissance maximale n'occasionnant pas de dérive métabolique cumulative en ce qui concerne les radicaux libres ou les protons circulants est par définition la **puissance de transition aéro-anaérobie**. D'un point de vue pratique il sera donc indispensable de déterminer cette zone pour des conditions de masses musculaires mises en jeu et de technique gestuelle identiques à celles du type d'entraînement retenu. Il faut donc vérifier cette zone en situation d'entraînement, dans les conditions habituelles d'équipement et de technique gestuelle. La préférence ira donc à la technique de référence qui consiste à vérifier, lors d'une activité régulière de puissance ou de vitesse constante, **"l'équilibre lactate"** ou **« l'équilibre protonique »**, c'est à dire la stabilité et l'égalité de leurs processus de production et d'élimination sur une durée de plusieurs dizaines de minutes. **La puissance cible** ou **la vitesse cible** à réaliser sera guidée par les résultats de laboratoire ou, à défaut, une estimation prenant en compte l'entraînement pratiqué et/ou les résultats individuels obtenus en compétition : puissance ou vitesse de transition représentent à la course à pied environ 75% des valeurs aérobies maximales chez un sujet "moyennement endurant", 55% chez un sédentaire qui l'est très peu, 95% chez un athlète de haut niveau aux qualités exceptionnelles.

Pour atteindre cette puissance il est aussi préférable d'éviter les dérives métaboliques transitoires liées aux augmentations brutales de puissance et aux déficits temporaires en O2. L'atteinte de ce niveau doit donc se faire selon un protocole d'augmentation de puissance progressive et régulière, soit sigmoïde, soit « triangulaire vrai » (chapitre 32). Le temps d'échauffement idéal est généralement proche de trente fois la constante de temps de la cinétique aérobie ; en l'absence d'évaluation de ces différents témoins de l'aptitude dont trop peu de laboratoires assurent la détermination, la constante de temps de la cinétique aérobie (en secondes) est alors considérée comme équivalente à l'âge (en années) majoré de 10. La durée d'échauffement nécessaire est donc différente si l'on s'adresse à des jeunes et/ou des sujets caractérisés par un excellent métabolisme aérobie ou des sujets âgés ou "détruits" par des entraînements durs ; elle peut aller d'une quinzaine de minutes à plus de trois quarts d'heure.

Pour calculer les vitesses correspondant à la transition aéro-anaérobie dans d'autres disciplines que la course à pied il est nécessaire de connaître la fonction d'efficacité dont l'équation générale est de la forme :

$$V = k_{\varphi} \times (DE_t - DE_0)^{\varphi}$$

Avec DE_t : dépense énergétique à la transition aéro-anaérobie et

DE_0 : dépense énergétique de repos

Pour la course, φ est très proche de 1 dans les vitesses inférieures à 20 km/h, ce qui permet d'utiliser une approximation du type :

$$V \approx 0.3 \times (DE_t - DE_0)$$

Avec **V** en $km.h^{-1}$, DE_t et DE_0 en $ml.min^{-1}.kg^{-1}$

Pour les activités impliquant des vitesses aériennes plus élevées comme le sprint en athlétisme (jusqu'à environ 36 $km.h^{-1}$) ou le vélo, ou encore des déplacements en milieu aquatique, il faut utiliser une équation particulière. Celle-ci peut être une équation moyenne, ou mieux, une équation individuelle déterminée grâce au protocole décrit dans la quatrième partie.

La durée de la séance

- La durée maximale pendant laquelle peut être maintenue la puissance de transition dépend des qualités génétiques et des qualités physiologiques du moment : l'endurance à ce niveau de puissance apparaît très dépendante des réserves énergétiques en carburants primaires en particulier glycogène musculaire des muscles actifs, et des réserves "structurales" en particulier hydrominérales en cas de contrainte thermique additionnelle et de sudation profuse. Le temps d'endurance correspondant est en général de l'ordre de l'heure, mais il peut varier de quelques dizaines de minutes à quelques heures (Fig. 28).

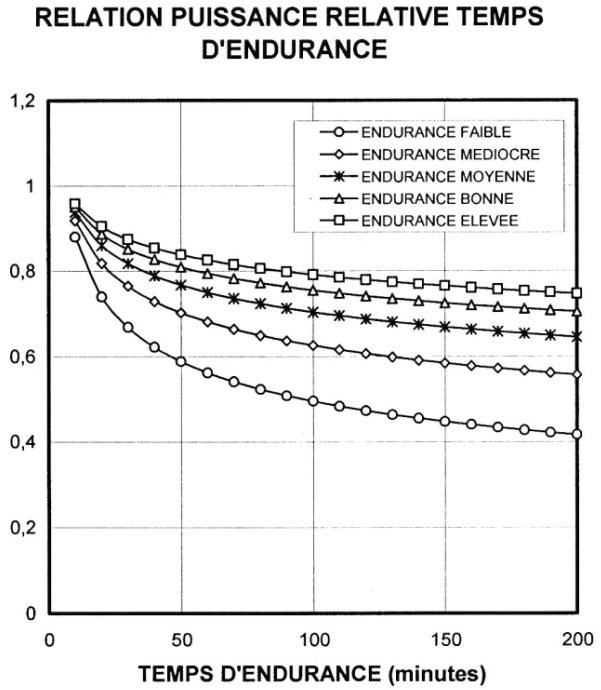


Figure 28.
La relation entre l'intensité d'une activité et la durée maximale supportable sur le plan biologique présente une allure curvilinéaire de type puissance dont les paramètres sont fonction des qualités individuelles d'endurance.

Dans la majorité des cas on est donc amené à réaliser **deux à trois séances exhaustives par semaine**, chaque séance étant séparée d'environ 48 à 72 heures de la suivante selon la rapidité des processus de récupération glycogénique. Des raisons de tolérance organique ou psychologique à ce type d'activité, ou plus simplement de disponibilité temporelle individuelle, conduisent parfois à augmenter le nombre et la fréquence des séances tout en en réduisant la durée. Il est indéniable par exemple qu'une telle activité gestuelle **répétitive et monotone** est d'autant plus difficile à tolérer que la notion de temps est longue et donc que le sujet est jeune. Il est aussi intéressant de rappeler que les processus de déstockage des réserves glycogéniques musculaires ne touchent que les cellules qui travaillent effectivement ; il est donc parfaitement possible de faire suivre une épreuve d'endurance localisée aux membres supérieurs par une même séance plus globale réalisée avec les membres inférieurs ou vice-versa.

-La **durée de la phase de récupération** anabolique complète d'une séance menée jusqu'à l'épuisement énergétique glycogénique est d'environ deux jours. Cependant, ce délai peut être modulé selon les conditions environnementales, d'hygiène de vie, (activité physique, diététique), et les caractéristiques biologiques individuelles (Fig. 13). En dehors du régime hyper-glucidique classique, les facteurs permettant d'accélérer la restauration des réserves glycogéniques sont : une excellente aptitude foncière, un $\dot{V}O_{2max}$ et une zone de transition élevés, une réhydratation énergétique glucidique pendant l'entraînement, une restauration hydro-glucidique rapide après l'entraînement. Même si cet entraînement a été parfaitement réalisé en dehors de toute participation anaérobie lactique, une phase de récupération active de puissance progressivement décroissante ou de puissance voisine de 40 à 50% de $\dot{V}O_{2max}$ reste préférable : elle évite la brutale disparition de stimulation des mécanorécepteurs tendineux, musculaires et articulaires et la chute corollaire de la stimulation sympathique ; celle-ci, couplée à une réduction du volume circulant d'origine sudorale, peut conduire à une hypotension transitoire susceptible d'affecter le fonctionnement du système neuroendocrinien de commande et de régulation et déclencher un petit malaise ou une lipothymie transitoire.

2- ENTRAINEMENT « BIOMECANIQUE »

L'aptitude « biomécanique » se caractérise donc par le **potentiel à restituer au monde extérieur en fonction de la disponibilité énergétique en ATP, des actes moteurs finalisés** (Fig. 29). Elle sera donc d'autant plus élevée que, à dépense énergétique équivalente, la puissance mécanique restituée au milieu extérieur sera élevée.

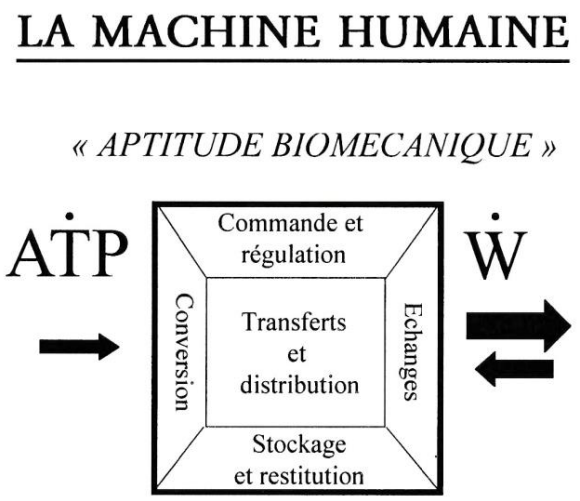


Figure 29. *L'aptitude biomécanique, comme l'aptitude biochimique, est sous-tendue par cinq fonctions bioénergétiques essentielles.*

Cette notion implicite « d'économie ou de rendement énergétique » doit cependant être considérée avec la plus grande prudence pour deux raisons essentielles. La première est que le rapport de la quantité d'énergie mécanique restituée à la quantité d'énergie chimique dépensée pour la produire, W/E, est une grandeur moyenne et sans dimension qui exclut le facteur temps. Cette grandeur gomme donc une partie essentielle du contenu de la fonction de transfert entre **$\mathring{W}$** et **$\mathring{E}$** qui illustre l'aptitude biomécanique. La deuxième est que les règles sportives ou l'appréciation des performances ne font qu'exceptionnellement appel à des critères se rapportant à un aspect simplement quantitatif de la restitution d'énergie mécanique ou du rendement ; elles sont même dans de nombreux cas en complète opposition avec ces critères. Plus que l'amplitude des grandeurs mécaniques **$\mathring{X}$** telles que déplacement, vitesse, accélération, force, puissance, c'est bien souvent leur **adaptation temporelle précise aux besoins de la gestuelles sportive** spécifique qui importe.

Ces différentes raisons nous ont donc conduit à privilégier comme représentant de l'aptitude biomécanique, non pas la grandeur mécanique **$\mathring{X}$** prise isolément, mais **la fonction reliant le critère temporel pertinent** de jugement habituel de l'activité spécifique en question, **$\mathring{X}$,** à la dépense énergétique correspondante (**DE**).

Celle-ci a été définie comme la **fonction d'efficacité : $\mathring{X}$ = f(DE).**

21- OBJECTIF

L'objectif prioritaire de l'entraînement biomécanique apparaît donc symétrique de celui de l'entraînement biochimique : obtenir **la meilleure fonction de transfert énergétique entre l'utilisation de l'ATP et la réalisation d'une performance motrice**. Cet objectif doit bien évidemment être satisfait sans provoquer d'altération structurale ou fonctionnelle des facteurs de l'aptitude biochimique vus précédemment.

L'optimisation de l'efficacité gestuelle spécifique dépend donc directement de l'amélioration du potentiel de toutes les structures impliquées par l'activité, et en particulier de celle des systèmes **ostéoarticulaires** et **musculo-tendineux**. Mais elle dépend aussi très fortement du système de **commande et de régulation** neuroendocrinien correspondant dont la particularité est d'être à **dominante consciente**. Les habiletés motrices doivent par ailleurs pouvoir s'exprimer quelles que soient les situations spatio-temporelles imposées par les règles professionnelles ou sportives de l'activité, les options matérielles, techniques ou stratégiques personnellement retenues, mais aussi celles des partenaires et des adversaires et enfin, les différentes conditions environnementales activatrices ou inhibitrices, physico-chimiques et psychosensorielles. L'amélioration de l'aptitude biomécanique nécessite donc une connaissance détaillée de l'ensemble des situations réellement rencontrées dans cette activité mais aussi des situations hypothétiques exceptionnelles susceptibles d'être provoquées ou subies, en particulier en situation de compétition. Cette démarche d'analyse représente en réalité un préalable indispensable à la réalisation de cet objectif.

Cette analyse spatio-temporelle doit comporter au minimum deux descriptifs : l'un mécanique externe des masses corporelles mises en jeu, l'autre temporel de l'évolution des forces résultantes et de la puissance développée. Ces éléments sont en effet indispensables pour rapporter la contrainte mécanique imposée par l'objectif de performance au potentiel biochimique et biomécanique de la structure biologique correspondante et juger de l'importance des améliorations indispensables. Deux remarques permettent d'illustrer le problème de l'entraînement biomécanique, en particulier lorsqu'il nécessite de réaliser des exercices supra-maximaux de haute intensité de type fractionné (Fig. 30) :

- lorsque la phase active est d'une durée **Ta** et d'une dépense énergétique **DEa** supérieure à celle de la transition aéro-anaérobie **DEt**, il est indispensable de réserver un temps de récupération active long, **Tr**, qui permette de retrouver des conditions métaboliques correctes, en particulier acido-basiques, afin d'éviter une détérioration non seulement de l'aptitude biochimique mais aussi de la gestuelle technique et donc un désapprentissage ; or pour des raisons métaboliques, le surcoût aérobie quantitatif de récupération est en effet très supérieur à la somme théorique des « déficit en O2 » liés au temps de réponse et au plafonnement de la consommation d'oxygène.

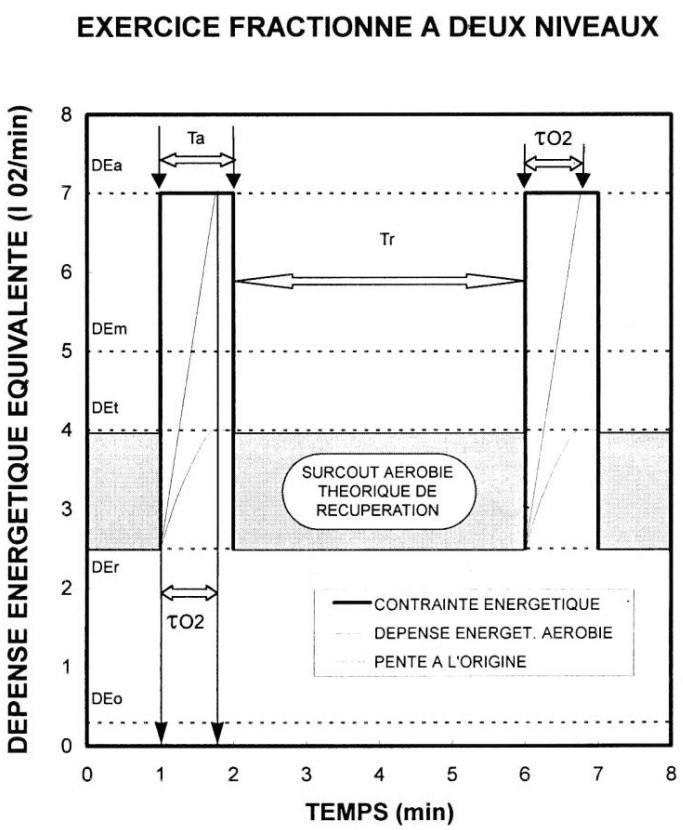


Figure 30. *La connaissance des lois régissant les mécanismes métaboliques qui permettent de satisfaire la demande énergétique en ATP lors des deux échelons de puissance, positif et négatif, de début et fin d'exercice rectangulaire est fondamentale. Ces lois sont en effet applicables à la limite à toutes les formes d'activités, sous réserve de les découper en séquences temporelles rectangulaires de puissance stable et de durée suffisamment petite.*
(a : activité; m : maximum aérobie; t : transition; r : récupération; o: repos).

- par ailleurs il faut se souvenir que pour une même puissance développée, produit de la cadence par la force, plus la cadence gestuelle est basse, plus les forces à appliquer sont élevées (Fig. 31) ; par voie de conséquence, plus le nombre de fibres musculaires à métabolisme anaérobie sont sollicitées, plus la quantité de déchets métaboliques délétères produits s'élève, et plus la récupération active nécessite un temps important.

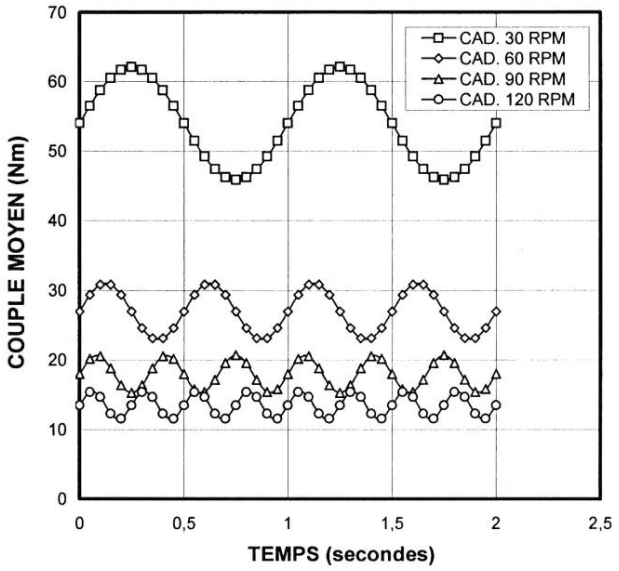


Figure 31. *L'activité physique est une suite alternative de contractions relaxations. La force résultante mise en jeu par la masse musculaire active peut être modélisée par une fonction sinusoïdale d'amplitude et de période plus ou moins variable. Pour une même puissance utile (proportionnelle au produit de la force par la cadence), l'intensité moyenne de la force développée et l'amplitude de ses oscillations augmentent si la cadence gestuelle diminue ; le pourcentage de fibres de type lla et llb mises en jeu ainsi que la part du métabolisme anaérobie sont alors supérieurs.*

La connaissance de l'évolution temporelle de la **puissance instantané** restituée au milieu extérieur permet de prédire le type de métabolisme mis en jeu par les masses musculaires actives, en particulier : sa **situation** par rapport aux trois limites biologiques de débits énergétiques de référence (**$\dot{V}O_{2max}$**, **$\dot{V}O_{2trans}$** et **$\dot{V}O_{2récup}$**), la valeur de la **pente** instantanée du signal par rapport aux constantes de temps des cinétiques métaboliques (τO_2 en particulier), enfin son **intégrale** (surface sous-jacente) par rapport à la capacité énergétique. Le découpage en intervalles de temps suffisamment petits permet de considérer l'activité comme une succession d'activités rectangulaires unitaires, ce qui facilite l'exploitation automatique informatisée.
La connaissance de l'évolution temporelle de la **force résultante** du groupe musculaire mis en jeu et de la **cadence moyenne de contractions** permet d'affiner la prédiction si l'on connaît la force maximale dynamique spécifique de ce groupe.

L'amélioration de **l'efficacité gestuelle** et de la performance nécessitent donc de bien appréhender tous les facteurs biologiques intrinsèques qui sous-tendent l'aptitude biomécanique y compris ceux, souvent négligés, qui touchent les processus neurologiques les plus élaborés de l'intelligence et plus généralement de l'apprentissage ainsi que du contrôle de la commande motrice. Le substratum biologique de ces caractéristiques est en effet bien souvent et abusivement considéré comme ne dépendant que de facteurs périphériques et "biochimiques" ; cette vision réductrice de la bioénergétique est une raison supplémentaire de multiplication des erreurs en matière d'entraînement, bon nombre des facteurs de performance étant surtout biomécaniques et, de plus, fortement dépendants de la commande centrale.

Les adaptations du système de commande et de régulation volontaire

La multiplication cellulaire affectant le système nerveux central est quasiment achevée dès les cinq premières années d'existence (Fig. 32). En revanche, le développement du **nombre et de l'efficacité des boutons terminaux et des synapses neuronales** impliquées dans les processus d'acquisition, de mémorisation, de renforcement et d'optimisation des activités gestuelles semble pouvoir se poursuivre très longtemps, tout au moins tant que l'utilisation répétitive de séquences motrices ordonnées identiques reste possible. C'est cette "impression" des multiples circuits fondamentaux préférentiels d'une activité, bibliothèque de programmes à disposition de l'utilisateur, qui est à la base des processus d'amélioration spatio-temporelle de la commande motrice, seuil d'activation, discrimination, coordination et synchronisation. Dans les cas les plus favorables, les délais d'acquisition à l'échelon central peuvent ne nécessiter que quelques jours. Parmi les facteurs qui améliorent la rapidité et la qualité des acquisitions mnémoniques interviennent classiquement l'intensité et la répétition de la stimulation ; encore est-il nécessaire de rappeler que la perception et le contenu psychoaffectif de la stimulation jouent un rôle activateur essentiel dans ces processus lorsqu'ils sont positifs ; à l'inverse, une intensité trop forte conduisant à une pénibilité élevée ou une fatigue excessive, une répétition trop fréquente et de caractère monotone, aboutissent à une lassitude et un désintéressement et des effets inverses de ceux recherchés.

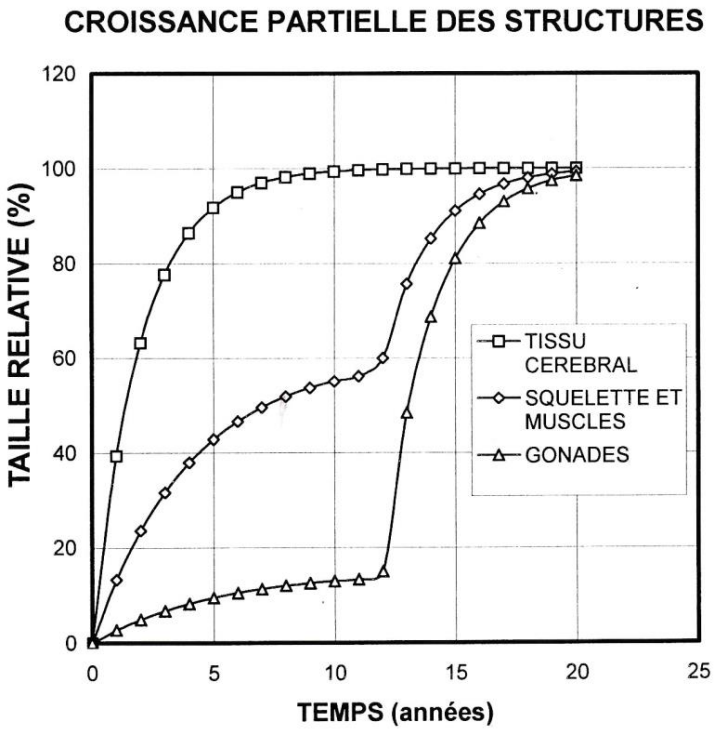


Figure 32. *La croissance de toutes les structures biomécaniques présente une accélération transitoire au moment de la puberté à l'exception du système nerveux central dont la multiplication cellulaire est presque achevée vers cinq ans.*

Les adaptations fonctionnelles des effecteurs biomécaniques

Les réglementations particulières concernant les modalités d'appréciation habituelle des performances, de notations et/ou de sanctions, précisent généralement une ou plusieurs grandeurs mécaniques qui sont en relation plus ou moins directe avec la puissance mécanique restituée au milieu extérieur $\mathring{W}$: il peut s'agir d'un nombre sans dimension, par exemple un score ou un nombre d'événements, ou d'une grandeur physique classique, temps, poids, distance. Ceci permet alors d'effectuer la conversion en grandeurs composites plus parlantes sur le plan énergétique, par exemple vitesse, force ou puissance. Nous retiendrons donc ces éléments comme critères ou descripteurs « fonctionnels » pertinents de l'aptitude biomécanique.

-la **précision et l'amplitude** gestuelles dépendent par exemple des caractéristiques physiques des tissus musculo-tendineux, et donc des propriétés viscoélastiques qui permettent à la fois étirements, souplesse et amortissement. La composante élastique parallèle liée au sarcolemme et au tissu conjonctif n'intervient sur les propriétés mécaniques du muscle que pour des étirements extrêmes de l'ordre de 120% de la longueur de repos. En dépit d'un certain degré d'élasticité, les tissus biologiques sont alors soumis à une tension exponentiellement croissante qui leur fait rapidement courir un risque majeur de déchirure mécanique. Aucune adaptation importante n'a été rapportée sur cette composante. En revanche la composante élastique série supportée par les tendons et les protéines contractiles, en particulier au niveau des liaisons actine-myosine, s'améliore lors des exercices concentriques et de souplesse. L'élasticité ou la compliance diminuent lors d'un entraînement exclusif d'endurance qui favorise le développement des fibres de type I de plus grande « raideur » alors qu'elles s'améliorent avec l'augmentation du nombre de fibres rapides de type II.

Mais ces propriétés sont aussi très dépendantes de la coordination inter et intramusculaire, et donc de la mise en jeu d'un grand nombre de neurones moteurs selon un déroulement temporel parfait. Cette organisation spatio-temporelle est d'autant plus efficace qu'elle répond à un processus automatique et une mémorisation parfaite faisant intervenir au minimum l'intelligence et la volonté. Ces facteurs centraux sont en revanche prioritaires dans la phase initiale de sélection et de déclenchement des programmes adaptés à la situation. Le développement du niveau de connaissances et de l'intelligence sont donc essentiels dès que l'activité présente un certain degré de complexité. L' acquisition d'une stabilité psychologique est un autre facteur fondamental : toutes les perturbations excessives, inhibitrices ou activatrices, d'origine psychique ou organique, stress ou dopage par exemple, sont en effet susceptibles de conduire à des prises de décisions inadaptées et des dérèglements marqués de la gestuelle ; leur intervention en cours d'exécution, non seulement en ralentit le déroulement, mais conduit généralement à des phénomènes d'ajustements compensatoires volontaires de moins bonne qualité tels des dépassements, des oscillations et/ou des tremblements.

-La **vitesse** d'exécution dépend en premier lieu du **délai** de mise en jeu d'une gestuelle spécifique : celui-ci s'améliore avec la qualité des capteurs extéroceptifs et proprioceptifs et celle de l'intégration centrale qui abaisse le temps de transit des informations sensorielles ou sensitives centripètes et motrices centrifuges. Elle dépend aussi des caractéristiques globales des muscles impliqués par l'activité : c'est ainsi que les muscles propulseurs des sprinters, ou des spécialistes des sauts ou des jets, se caractérisent par un pourcentage de fibres rapides de type IIa et IIb un peu plus élevé statistiquement que celui des sédentaires ou, a fortiori, que celui des sujets entraînés aux exercices de fond. Les caractéristiques biochimiques de ces fibres à dominante anaérobie, riches en ATPase, pauvres en mitochondries et en enzymes du métabolisme aérobie, sont souvent mises en avant et à tort comme seule raison des qualités spécifiques de ces sportifs. L'attitude corollaire classique qui en découle en matière d'entraînement est de privilégier les exercices mettant en jeu principalement et quantitativement ce type de métabolisme ! C'est oublier que les orientations typologique et fonctionnelles des fibres sont prioritairement dépendantes de leurs unités motrices et de leur innervation. Leur mise en jeu pour un groupe musculaire spécifique, n'a qu'une relation médiocre et déphasée avec le métabolisme général tel qu'on l'observe ; en revanche elle est étroitement corrélée au pourcentage de la force maximale volontaire de ce même groupe (Fig. 33).

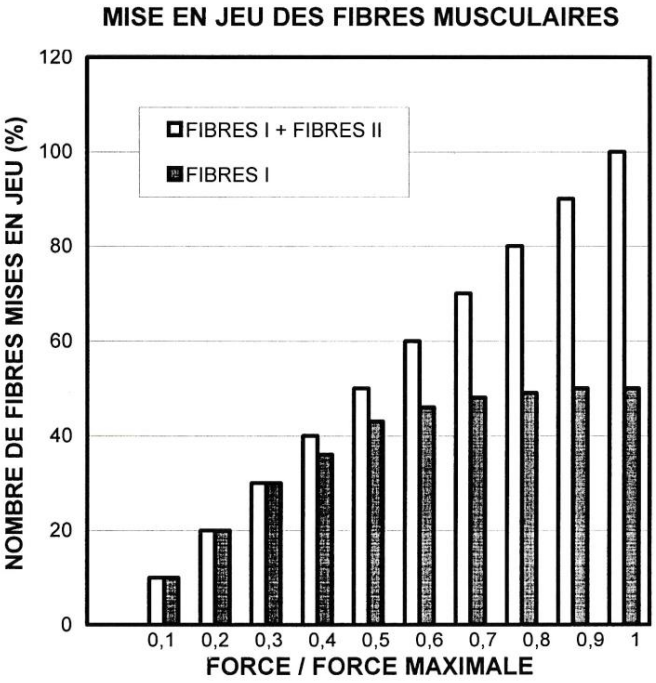


Figure 33. *La réduction de la charge peut limiter la mise en jeu des fibres à celles de type I ; la pratique d'exercices dynamiques de ce type permet de développer spécifiquement la vitesse des fibres lentes de type I. En évitant le travail excentrique ou lent et en conservant une activité dynamique associée à des forces plus importantes, il est aussi possible d'améliorer le potentiel oxydatif (vascularisation, mitochondries, enzymes aérobies) des fibres rapides ce qui leur confère une récupération métabolique très supérieure.*

-**la force** gestuelle est classiquement dépendante du volume et de la section musculaire, mais surtout du nombre de cellules et de leur contenu en protéines contractiles et en particulier du potentiel de liaisons actine-myosine susceptibles d'être établies. Mais elle est aussi très dépendante des unités motrices qui les activent, de la fréquence de décharge appliquée, de leurs capacités de recrutement, et de leur synchronisation par la commande centrale. Les qualités neurologiques correspondantes innées et développées au cours de l'entraînement telles que motivation, capacité de concentration, résistance à la souffrance, peuvent là encore intervenir et se modifier sous l'effet de facteurs organiques et psychologiques au moment de la compétition. Enfin, il faut bien admettre que dans la majorité des sports, à l'exception du body-building qui privilégie le volume musculaire, voire l'haltérophilie, ou à l'opposé la danse, dont l'un des objectifs peut être d'atténuer certains reliefs musculaires pour des raisons esthétiques, le paramètre important est non la force isométrique mais la **force dynamique** ou son produit par la vitesse, c'est à dire encore une fois la **puissance** développée.

Les adaptations structurales des effecteurs biomécaniques

La mise en jeu des fibres musculaires s'accompagne généralement d'une augmentation sensible mais modérée de leur volume et de leur section, tout au moins, tant que l'entraînement ne déborde pas sur le secteur « pathologique ». Une partie de cette augmentation est liée à l'augmentation des protéines contractiles. En revanche il ne semble exister aucune multiplication cellulaire significative : l'apparition de nouvelles cellules correspond en réalité au développement de cellules embryonnaires de Moro qui viennent occuper la place des cellules détruites par une activité traumatique. Certaines structures se développent ou se multiplient : tel est le cas des néo-capillaires, des mitochondries, des enzymes ou des réserves énergétiques.

Les développements excessifs de volume traduisent dans la majorité des cas, plus qu'une augmentation relative du pool protéique, une imprégnation hydrominérale anormale, une raréfaction des capillaires et des enzymes aérobies avec pour conséquence un ralentissement dramatique de la vitesse des transferts énergétiques et un effondrement de l'aptitude biochimique. Ce tableau de vieillissement précoce est certes souvent accentué par le jeu chronique et accéléré des destructions et remplacements successifs par des cellules embryonnaires, la stimulation artificielle de la synthèse protéique via l'imprégnation calcique lésionnelle, la surcharge alimentaire protéique et l'adjonction d'hormones anabolisantes sexuelles ou hypophysaires. Le potentiel biomécanique de ces sujets handicapés ne peut plus s'exprimer que dans un domaine de plus en plus étroit qui limite la performance soit au volume soit à une gestuelle pauvre et stéréotypée dont on finit par se demander quel rôle socio-éducatif peut bien alors conserver ce type de « pseudo-sport ».

Le développement périphérique des structures musculaires accompagne toujours celui des unités motrices qui les mettent en jeu : amélioration des processus de synthèse d'acétylcholine au niveau de la plaque motrice, rapidité de transfert de la dépolarisation via le système T, le réticulum sarcoplasmique et la libération de Ca++. Le maintien répétitif de potentiels d'action en provenance du motoneurone est un facteur indispensable à la survie musculaire cellulaire. Leur disparition s'accompagne d'une dégénérescence rapide et d'une atrophie des structures protéiques contractiles qu'ils innervent. Cette **dépendance trophique** du système biomécanique de transformation de l'énergie potentielle de l'ATP en énergie mécanique est très générale puisqu'elle touche aussi bien les structures ostéoarticulaires et ligamentaires que musculo-tendineuses : il existe en effet une relation étroite entre la sollicitation articulaire et le degré d'hydratation et de résistance mécanique des cartilages articulaires, entre l'entraînement musculaire et la force de jonction ostéoligamentaire, entre synthèse des chaînes moléculaires de collagène et de glyco-aminoglycanes et la synthèse des protéines contractiles, entre l'intensité et la direction des forces appliquées et la minéralisation osseuse selon les lignes de force appliquées.

Mais ces adaptations ne se manifestent qu'entre **certaines limites individuelles** en deçà et au-delà desquelles l'involution ou a contrario l'usure l'emportent sur les processus adaptatifs. Comme nous l'avons déjà signalé, le développement de forces extérieures faisant travailler les cellules musculaires dans la zone dangereuse de tension active décroissante, zone de forte participation de la seule résistance mécanique des matériaux (travail excentrique et pliométrie en particulier) conduit très fréquemment à des dégâts considérables (Fig. 34).

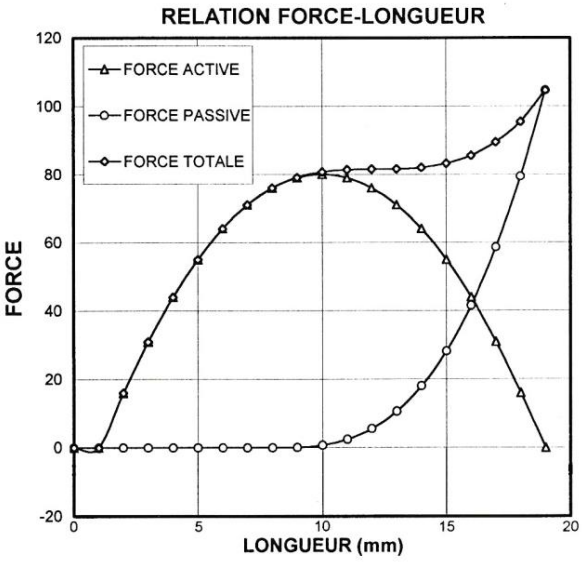


Figure 34. *La tension active développée par les liaisons chimiques établies entre les filaments d'actine et de myosine présente une allure parabolique dont le maximum correspond à un étirement léger à peine supérieur à la longueur de relaxation Lo. Pour un étirement supérieur, le nombre de ponts de liaison disponibles diminue ; plus l'étirement s'accentue, plus la tension totale se trouve alors supportée par les structures non contractiles et plus les risques de déchirure tissulaire deviennent importants.*

Il en est de même des activités impliquant de façon répétitive et cumulative un envahissement par les radicaux libres et une acidose intracellulaire telle que celle obtenue avec une concentration en lactate intramusculaire à 30 mmol/kg (pH<6.40) qui bloque et déforme les structures protéiniques et les enzymes. La répétition des gestes sportifs dans des conditions de fatigues centrale et périphérique telles que l'exécution ne peut être qu'altérée, présente, outre l'inconvénient majeur d'induire un **désapprentissage**, celui de faire courir inutilement des risques de chutes et d'accidents et, par voie de conséquence, de lassitude et de **démobilisation psychologique** majeure (Fig.35).

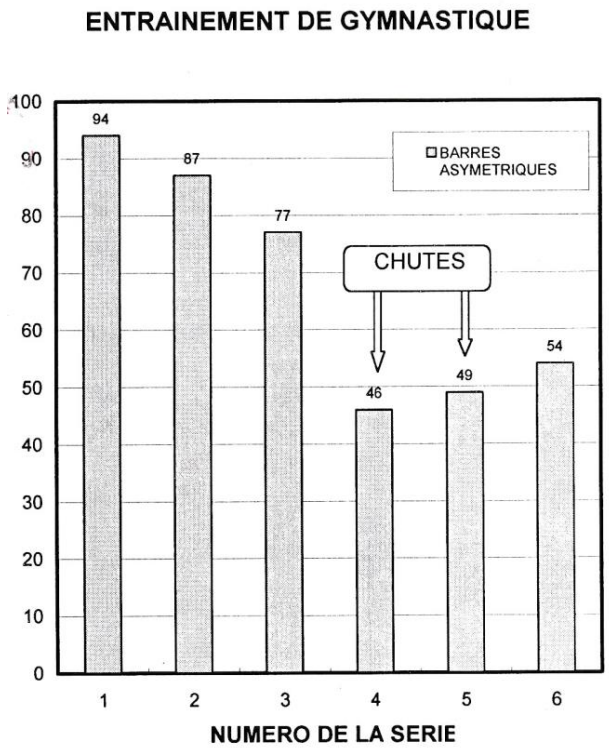


Figure 35.
Lors de cet entraînement en gymnastique féminine de haut niveau, la répétition trop rapprochée de séquences d'activités de forte dépense énergétique s'accompagne d'une baisse progressive des puissances, forces et vitesse d'exécution.
La dégradation métabolique locale rend hasardeuse la réalisation technique des exercices imposés ; elle conduit à la quatrième et cinquième série à un échec et une chute dont les conséquences peuvent être désastreuses tant sur le plan organique que psychologique.

L'acharnement sportif au même titre que l'acharnement thérapeutique, et a fortiori quand ils sont couplés tous les deux comme dans les programmes d'entraînements « surhomme » associant des volumes d'entraînement et de dopage hormonal considérables, conduisent généralement à des lésions périphériques et centrales majeures : les **accidents et les contre-performances** qui conduisent à une disparition de la scène internationale aboutissent rapidement au désintéressement des financiers du sport et des médias puis à celui du public et de la société en général.

22- CARACTERISTIQUES DIMENSIONNELLES DE LA SEANCE

Les caractéristiques mécaniques et environnementales des séances d'entraînement biomécanique doivent donc en première intention respecter **le principe de spécificité**, c'est à dire reproduire celles de la réalité professionnelle ou compétitive. Cette activité de simulation d'une activité théorique idéale, fondée généralement sur l'analyse des meilleures performances du moment, se doit malgré tout d'intégrer plusieurs paramètres fondamentaux : d'une part les caractéristiques biologiques individuelles qui sont obligatoirement différentes de celles des modèles réels ou théoriques analysés ainsi que les éventualités d'évolutions technico-tactiques, de matériaux et d'environnement, qui ne manqueront pas d'apparaître.

Quelle que soit la finesse de l'analyse obligatoire des caractéristiques mécaniques d'une performance, **le modèle d'activité** qui en découle ne doit être considéré que comme un guide préférentiel autour duquel devront être structurées plusieurs hypothèses et activités qui doivent en diverger sensiblement. En matière de performance, le « sportivement correct » doit toujours être envisagé avec réserves. J'en veux pour preuve la réussite liée au développement de la recherche et à l'innovation sous toutes ses formes dans certains sports ou Fédérations sportives (Fig. 25), ou les pertes de médailles et les retards liés à la force des traditions dans d'autres (Fig. 36).

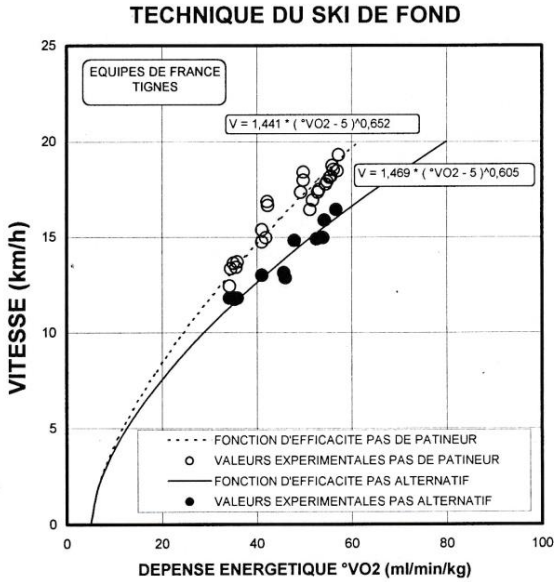


Figure 36. *Les premières analyses d'efficacité biomécanique du pas de patineur réalisées avec des athlètes des Equipes de France ont confirmé l'hypothèse mécanique avancée par le Laboratoire de la Performance ASTB : un appui dont la direction fait un angle supérieur à 45° par rapport à l'axe de glisse du ski permet une économie énergétique moyenne considérable de plus de 25 % par rapport au pas alternatif. La sensation de surcoût énergétique opposée par les entraîneurs de l'époque pour refuser cette évolution correspondait simplement à une mise en jeu de masses musculaires plus conséquentes pour des vitesses de progression très supérieures à celles qu'il était possible d'atteindre avec le pas alternatif.*

Les masses actives et les masses mobilisées

Le premier travail consiste à préciser les **masses motrices** à l'origine des mouvements et déplacements ainsi que les **masses mobilisées**, internes corporelles, principales et segmentaires, et externes, outils, objets, accessoires professionnels ou sportifs. Ceci implique donc une connaissance parfaite des éléments biométriques classiques du sportif, à savoir, dimensions corporelles essentielles, taille, longueur des segments, circonférences, mais aussi surfaces, volumes et poids assortis de leurs centres de gravité correspondants. Cette analyse préliminaire qui peut paraître fastidieuse est en réalité grandement simplifiée par l'utilisation du modèle cylindrique vu précédemment (Fig. 27). La même démarche est bien évidemment à appliquer à l'ensemble des masses externes mobilisées lors de l'activité. Ceci permet ensuite de sélectionner, en plus de l'activité de compétition, des activités physiques plus variées et plus ludiques, mais comportant l'activité fondamentale spécifique modèle.

L'environnement physique

Le second travail nécessite de préciser l'ensemble des caractéristiques physico-chimiques du ou des milieux dans lesquels s'effectuent les déplacements des masses actives : son état, solide, liquide, gazeux ou mixte, ses caractéristiques physiques, température, composition, pression, densité, mouvements et déformations propres, bruits, rayonnements, relief, luminosité. Ces éléments permettent de définir le type de frictions et de résistances aux déplacements rencontrées ainsi que les autres échanges de matière et d'énergie avec le milieu, gazeux, thermiques, informationnels.

Un même entraînement réalisé à une **altitude supérieure** se caractérise par une contrainte mécanique externe plus faible par baisse de la densité et de la résistance à la pénétration dans l'air, mais réduit aussi l'aptitude biochimique du fait de l'hypoxie. Le résultat final est une augmentation du potentiel de performance. Cependant, la baisse d'aptitude plus prononcée en début d'acclimatement, impose, pour conserver durant cette phase une dépense énergétique relative d'entraînement identique à celle du niveau antérieur, de réduire parallèlement les puissances d'activité (Fig. 37).

Dans certains cas il peut même être très important de préciser les propriétés « chimiques particulières » du milieu, celles-ci étant susceptibles d'interférer directement avec les masses actives ou les interfaces et de modifier les lois concernant les appuis, les transmissions de force ou les résistances à la pénétration. C'est ainsi qu'un entraînement de ski de fond réalisé dans les mêmes conditions techniques de matériel, de cadence et de vitesse, peut en réalité représenter des modalités d'astreinte biologique différentes si les conditions d'ensoleillement ou de température ambiante et donc de qualité de neige et de glisse changent brutalement.

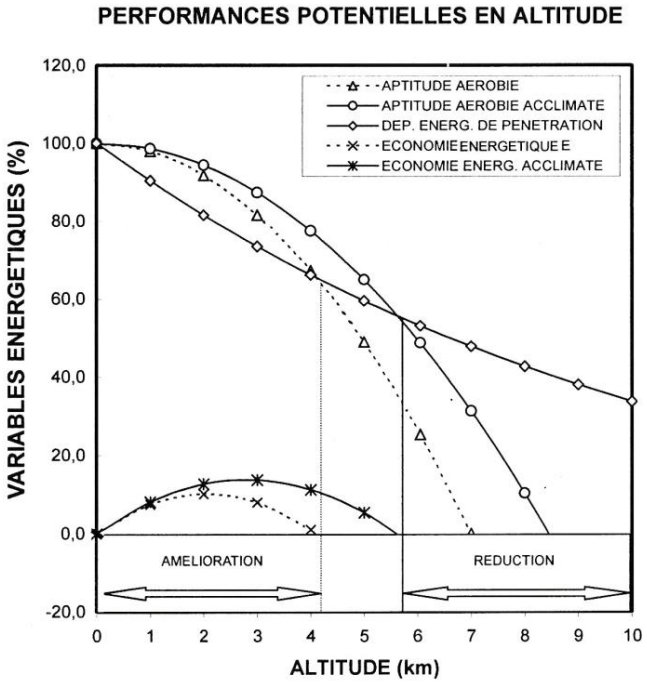


Figure 37. *La réduction de la densité de l'air en fonction de l'altitude possède deux effets opposés sur l'aptitude : réduction de l'aptitude biochimique due à l'hypoxie et amélioration de l'aptitude biomécanique par réduction de la résistance à la pénétration aérienne. L'amélioration théorique de la performance en vélo présente une allure parabolique dont le maximum, bien que variable d'un athlète à un autre se situe vers 2000 mètres. Ce facteur est l'un de ceux pris en compte par le Laboratoire de la Performance ASTB lors de la préparation de Tristan MOURIC pour son record du monde de l'heure Handisport à Mexico. Cet athlète amputé d'un bras et d'une jambe est ainsi passé de 38,785 km en 88 à 40,400 km en une heure le 1er octobre 1989.*

Les interfaces

Le dernier consiste à analyser plus spécifiquement la qualité des jonctions entre les différentes masses motrices et mobilisées, systèmes de fixations ou de contention, sangles, butées, calages, éléments vestimentaires, colles, absorbants, desséchants, entre les masses actives et l'environnement, déformabilité, amortissement, solubilité, tribologie. Tous ces éléments peuvent intervenir dans la transmission des forces aux masses mobilisées avec des conséquences plus ou moins importantes tant sur le plan traumatique que sur le plan des déperditions énergétiques.

EXTRAIT CHRONOLOGIQUE DE LA BIBLIOGRAPHIE A.S.T.B.
utilisée pour l'iconographie et le texte de l'ouvrage
"L'ENTRAÎNEMENT SCIENTIFIQUE INDIVIDUEL"

- R. HENANE, JP. ECLACHE
La thermolyse au cours de l'exercice physique : comparaison entre des athlètes et des sujets non entraînés.
Communication, Journées Nationales de Médecine du Sport, St Jean de Monts, 1977.

- S. QUARD, JP. ECLACHE, G. WELSCH, B. TURPIN
Evolution de l'aptitude à l'exercice intense et prolongé au cours de trois mois d'entraînement.
J. Physiol., 74 (7), 44A, 1978.

- G. WELSCH (Dir. JP. ECLACHE)
Influence d'un entraînement en endurance sur l'aptitude bioénergétique.
Thèse Médecine, Lyon, 1979.

- B. MELIN, S. QUARD, JP. ECLACHE
Effet d'un exercice intense et prolongé conduit jusqu'à l'épuisement sur les systèmes rénine-angiotensine-aldostérone et ADH-neurophysine chez des sujets entraînés et non entraînés.
Médecine du sport, 54, 3, 27-31, 1980.

- B. MELIN, JP. ECLACHE, G. GEELEN, G. ANNAT, AM. ALLEVARD, E. JARSAILLON, A. ZEBIDI, JJ. LEGROS, C. GHARIB
Plasma AVP, neurophysin, renin activity and aldosterone during a submaximal exercise performed until exhaustion in trained and untrained men.
Eur. J. Appl. Physiol., 44(2), 141-151, 1980.

- JP. ECLACHE
Bases physiologiques de l'entraînement physique et sportif.
Bull. Ass. Sport Biol, 4, 1980.
Médecine du sport, 54, 3, 56-63, 1980.

- JM. FERRET, JP. ECLACHE, S. QUARD, A. JACQUET, R. VIRET
Approche énergétique de l'entraînement d'une équipe professionnelle de football.
Cinésiologie, 77(3), 15-25, 1980.

- JP. ECLACHE
Entraînement physique et sportif.
Ann. Kinésither., 8(3), 77-101, 1981.

- JP. ECLACHE
Comment reprendre sans risque et à tout âge une activité physique et sportive.
Cyclo 2000, 28-29, 1981 & R.J.M., 1981.

- F. BAUBY (Dir. JP. ECLACHE)
Intérêt d'un réentraînement aérobie chez les sujets neurodystoniques.
Thèse Médecine, Lyon, 1981.

- JP. ECLACHE, E. GOROSTIAGA
Importance de différents facteurs modifiant l'aptitude physique ; applications à la préparation des sportifs de haut niveau.
Revue de Médecine Fonctionnelle, 16, 99-134, 1983.

- D. AGUILERA (Dir. JP. ECLACHE)
Essai d'élaboration d'un outil de travail pour l'entraîneur. A propos du suivi de l'équipe de France militaire de ski de fond.
Thèse Médecine, Lyon, 1984.

- E. GOROSTIAGA, JM. FERRET, JP. ECLACHE
Entraînement fractionné.
Cinésiologie, 23, 143-144, 1984.

- E. GOROSTIAGA, JM. FERRET, JP. ECLACHE
Influence de trois types d'échauffement progressif sur un exercice sous-maximal.
Cinésiologie, 23, 131-140, 1984 & Bull. Ass. Sport Biol., 2, 1992.

- JP. ECLACHE, JM. FERRET, E. GOROSTIAGA, G. VIALATON, G. MURGUES, M. MICHEL
Etude du coût énergétique de différentes formes d'entraînement et d'exercices en basket féminin.
Bull. Ass. Sport Biol., suppl. 1, 1984 & Abstracts, XXI° J. Med. F.F.B.B., Lyon, 1984.

- JP. ECLACHE, C. BENEZIT, A. GOETSCHY
Etude des différents facteurs biomécaniques et de leur influence sur l'efficacité motrice lors de la propulsion en canoë-kayak.
Bull. Ass. Sport Biol., 4, 53p, 1985.

- C. FROSSARD (Dir. JP. ECLACHE)
L'entraînement physique en descente de rivière sportive.
Mémoire, Licence STAPS, Grenoble, 1985.

- JP. ECLACHE, JM. GONZALEZ DE SUSO, B. MELIN
Le coût énergétique de différents exercices d'entraînement et de compétition en ski de fond.
Rapport Technique F.F.S. & Bull. Ass. Sport Biol., supp. 2, 1987.

- JP. ECLACHE, AX. BIGARD, P. CONSTANTIN
Estudio de un recorrido en sweed-ski (esqui sobre ruedas) para el seguimiento del equip de Francia militar de ski.
Rapport Technique, 1985 & Archivos de Medicina del Deporte, 4(13), 15-22, 1987.

- E. GOROSTIAGA, JP. ECLACHE
La restitution des substrats énergétiques lors de la récupération d'un exercice ; le devenir métabolique de l'acide lactique.
Bull. Ass. Sport Biol., 2, 1-37, 1985.

- J. BROISSARD (Dir. JP. ECLACHE)
Intérêt de l'apport d'une séance d'endurance dans la programmation d'une séance d'entraînement d'un centre de formation de football.
Mémoire, Brevet d'Etat 3° degré, Lyon, 1986.

- C. DESCHAUMES (Dir. JP. ECLACHE)
Intérêt de la mesure de la fréquence cardiaque individuelle dans la préparation sportive des athlètes de haut niveau à travers l'analyse de qualité du sport tester PE 3000.
Mémoire, Licence STAPS, Lyon, 1986.

- M. GRANDCLEMENT (Dir. JP. ECLACHE)
Le suivi médico-physiologique et l'entraînement d'une équipe de ski de compétition de haut niveau, l'équipe de France militaire de triathlon.
Diplôme technique, option spécialité, EMHM, Chamonix, 1986.

- M. GANZIN (Dir. JP. ECLACHE)
Essai de quantification du coût énergétique des exercices compétitifs chez des gymnastes féminines de 10 à 18 ans.
Mémoire, Brevet d'Etat 3° degré, Grenoble, 1986.

- JP. ECLACHE
L'activité aérobie foncière dans la préparation sportive.
Bull. Ass. Sport Biol., 5, 5-7, 1987.

- JP. ECLACHE
Le suivi médico-scientifique des athlètes sur le terrain.
Bull. Ass. Sport Biol., 5, 8-10, 1987.

- M. FOREST (Dir. JP. ECLACHE)
Record du monde de sauvetage.
Mémoire, Brevet d'Etat E.S., Natation, Macon, 1987.

- E. GERMAIN (Dir. JP. ECLACHE)
Coût énergétique du pas de patineur en ski de fond
Mémoire, Licence STAPS, Lyon, 1987.

- JP. ECLACHE
Diagnostic et traitement de l'incompatibilité entre préparation technique et préparation biologique.
Bull. Ass. Sport Biol., 3/4, 18-19, 1989.

- C. METELLUS (Dir. JP. ECLACHE)
24 heures d'endurance en natation.
Mémoire, Brevet d'Etat M.N.S., Lyon, 1989.

- JM. GONZALEZ DE SUSO (Dir. JP. ECLACHE)
Etude de la récupération d'un exercice maximal des membres supérieurs. Apport de la sRMN du Phosphore 31.
Bull. Ass. Sport Biol., 6, 1990.

- G. COQUARD, S. ANDRE (Dir. JP. ECLACHE)
Essai de quantification du coût énergétique de l'activité de 3° ligne aile au cours d'un match de rugby.
Mémoire, Licence STAPS, Lyon, 1990.

- JP. ECLACHE
Suivi médical en vue de la préparation d'un record de l'heure cycliste.
Cinésiologie, 139, 216-220, 1991.

- M. DORLIN (Dir. JP. ECLACHE)
Dépense énergétique d'un match de rugby. Etude de la variation des durées de pauses et de la nature des actions.
Mémoire, D.E.A. STAPS, Lyon, 1992.

- JP. ECLACHE
L'entraînement et l'acclimatement : effets sur l'adaptation cardio-respiratoire et métabolique et les performances en ambiance chaude.
Bull. Ass. Sport Biol., 1, 1-16, 1992.

- E. GOROSTIAGA (Dir. JP. ECLACHE)
Etudes de quelques facteurs influençant l'aptitude physique : échauffement, entraînement, agents pharmacologiques.
Thèse, Doctorat d'Université, St Etienne, 1992.

- JP. ECLACHE, S. ECLACHE, B. DESPRES
Mise en place et suivi d'un réentraînement scientifique individualisé pour l'amélioration du potentiel opérationnel d'une population de pompiers de l'industrie chimique.
Abstracts, IV° Congrès International des Services Sanitaires dans les Corps de Pompiers, Madrid, 205-207, 1994.

- JP. ECLACHE, S. ECLACHE, D. MORELON, JM. AUCLAIR, X. SALEIL, JN. TRENTESEAUX
Préparation médico-scientifique du record du monde de l'heure féminin sur piste.
Bull. Ass. Sport Trav. Biol., 3, 19, 1995.

QUEQUES LECTURES CONSEILLEES
Pour en savoir plus

Textbook of work physiology. Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1970.
P.O. ASTRAND et K. RODAHL

La détermination de l'aptitude physique. Aspects physiologiques.
In : Les aptitudes motrices : structure et évaluation, Vigot, Paris, 1991.
J.P. ECLACHE

Modélisation des cinétiques métaboliques d'activité et de récupération dans le suivi de l'entraînement et des compétitions. ASTB, Lyon, 1998.
J.P. ECLACHE

Le Marathon. Vigot, Paris, 1991
F. PERONNET

Integration of medical and sports sciences. Karger, Bâle, 1992.
Y. SATO, J. POORTMANS, I. HASHIMOTO, Y. OSHIDA

Lexique et abréviations

Acidose : état biologique caractérisé par une élévation de la concentration en ions hydrogènes libres (protons) et donc une diminution du pH.

Actine : protéine contractile porteuse de sites de liaison sur lesquels se fixent les têtes de myosine lors de la contraction musculaire.

Adénosine-tri-phosphate (ATP) : molécule universelle permettant le stockage d'une partie de l'énergie de dégradation des substrats énergétiques primaires (essentiellement lipides et glucides) et servant de « carburant raffiné » aux cellules vivantes.

Aérobiose : état métabolique de certains organismes vivants utilisant les substrats énergétiques en présence d'oxygène.

Alcalose : état biologique caractérisé par une réduction de la concentration en ions hydrogènes libres (protons) et donc une élévation du pH.

An : abréviation utilisée pour caractériser l'état anaérobie du processus de référence.

Anabolisme : processus métabolique de synthèse moléculaire ou tissulaire.

Anaérobiose : état métabolique de certains organismes vivants transformant les substrats énergétiques en l'absence d'oxygène.

ANVAR : abréviation de : Agence Nationale pour la valorisation de la recherche.

Aptitude (physique ou motrice) : potentiel ou disposition naturelle ou acquise à réaliser des actes moteurs.

Aptitude biochimique : aptitude à utiliser les substrats et l'oxygène du milieu extérieur pour fabriquer de l'ATP.

Aptitude biomécanique : aptitude à utiliser l'ATP pour restituer de l'énergie mécanique au milieu extérieur.

ASTB : abréviation de Association Sport Travail Biologie.

Astreinte : usure des structures et des réserves biologiques consécutive à une contrainte quantifiable par la mesure de dépense énergétique (DE).

Cadence : nombre d'évènements répétitifs par unité de temps ; dans les activités motrices symétriques latéralisées (marche, course, pédalage, manivelage, pagayage), la cadence est généralement double de la fréquence.

Capacité aérobie : quantité d'énergie potentielle individuelle correspondant à une activité ne mettant en jeu que des processus métaboliques aérobies.

Catabolisme : processus métabolique de dégradation et/ou de déstructuration moléculaire ou tissulaire.

Cinétique : relatif à l'évolution temporelle d'un phénomène ou d'une variable.

Concentration [ ] : rapport de la quantité d'un élément (ou d'une molécule) à la quantité de tissu support ou de solvant dans lesquels il se situe ; s'exprime souvent en millimoles par unité de volume par exemple en $mmol.l^{-1}$ (ou $mM.l^{-1}$).

Consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2m}$ ou $\dot{V}O_{2max}$) : débit maximal moyen d'oxygène mesuré sur une minute ; caractéristique du potentiel aérobie individuel pour une activité spécifique et le groupe musculaire mis en jeu correspondant ; s'exprime en unités de volume dans les conditions standard (STPD) ramenées au temps (en $l.min^{-1}$ ou $ml.min^{-1}.kg^{-1}$).

Constante de temps (τ) : temps théorique que mettrait un signal à atteindre sa limite si sa vitesse était maintenue constante et identique à la vitesse initiale.

CSTB : abréviation de club sport travail biologie ; structure ou plateau technique agréé bénéficiant d'un soutien scientifique, matériel ou financier de l'ASTB.

CTN : abréviation de conseiller technique national.

DE : abréviation de dépense énergétique ; pour éviter les confusions traditionnelles, cette abréviation devrait être exclusivement réservée à la désignation d'un débit d'énergie **$\dot{E}$**.

Délai : temps séparant un événement d'un autre événement, par exemple une perturbation ou une stimulation du début de la réponse du système qui y est soumis ; une confusion habituelle et catastrophique est de confondre délai et temps de réponse.

Dépense énergétique (DE ou **$\dot{E}$) :** Débit énergétique total correspondant aux différents processus métaboliques aérobies et anaérobies, généralement exprimé en watts ou en kilocalories par unité de temps par exemple en $kcal.min^{-1}$.

E : abréviation de quantité d'énergie, produit d'un débit par un temps ($E = \dot{E} \times t$) ; s'exprime en Joules (J), en calories (cal) ou en quantité équivalente d'oxygène utilisée VO_2' ou $VO_{2éq}$, en litres (l), ou millilitres (ml), ou millilitres par kilogramme ($ml.kg^{-1}$).

$\dot{E}$: abréviation de dépense énergétique ou de débit d'énergie.

Eau métabolique (H_2O_c) : eau endogène apparaissant lors des réactions métaboliques de transformations des substrats énergétiques.

Efficacité : rapport d'une performance à la dépense énergétique correspondante ; la fonction d'efficacité qui est la fonction mathématique reliant ces deux variables n'est que très rarement linéaire ; ceci rend très dangereuse l'utilisation de l'efficacité et du rendement moyens dans les domaines d'optimisation de l'aptitude et des performances.

Energie : quantité de travail s'exprimant en Joule (J) ou en kilocalorie (kcal).

Enzyme : catalyseur moléculaire de type protéique qui permet et accélère les réactions métaboliques des organismes vivants.

F : abréviation de force.

FC : abréviation de fréquence cardiaque.

FC_m (FC_{max}) : abréviation de fréquence cardiaque maximale ; contrairement à une idée courante, cette grandeur est très variable d'un sujet à un autre et sensible à de nombreux facteurs innés et acquis.

FC_o : fréquence cardiaque de repos théorique, i.e. en l'absence d'exercice physique ou sportif.

FC_t (FC_{trans}) : fréquence cardiaque d'état stable correspondant à une activité spécifique dont la puissance correspond à la transition aéro-anaérobie individuelle.

Fibre (musculaire) : la fibre musculaire est en réalité constituée d'une seule cellule allongée comportant plusieurs noyaux.

Filière (énergétique) : terme de vulgarisation utilisé pour désigner la suite ordonnée des structures supports et des réactions propres à un type particulier de métabolisme.

FMV : abréviation de force maximale volontaire.

Force (F) : action développée par un système (musculaire par exemple), susceptible de modifier l'état de repos ou le mouvement d'autres systèmes. La force s'exprime en général en Newton (N).

Fractionnement : terme utilisé pour désigner l'action qui consiste à subdiviser un ensemble en plusieurs sous-ensembles constitutifs. Le fractionnement traditionnel d'une activité réduit aléatoirement sa puissance moyenne contrairement au fractionnement moderne qui impose un état métabolique prédéfini.

Fréquence : nombre d'évènements par unité de temps, inverse d'une période ; dans les activités motrices symétriques latéralisées (marche, course, pédalage, manivelage, pagayage), la cadence est généralement double de la fréquence.

Fréquence cardiaque (FC) : rythme des contractions systoliques du cœur ; s'exprime en battements par minute (bpm) ou en min^{-1}.

FT : abréviation de « fast twitch » désignant selon la nomenclature internationale les cellules musculaires à contraction rapide.

GLY : abréviation de glycogène.

Glycogène (GLY) : molécule constituée d'un ensemble ramifié de molécules de glucose captant dans son maillage des molécules d'eau ; forme essentielle de réserve musculaire et hépatique des glucides.

Glycolyse : processus métabolique de dégradation des glucides.

H^+ : ion hydrogène libre chargé positivement en milieu hydrique, ou proton, responsable de l'acidité du milieu dans lequel il se trouve.

Hormone : molécule protéique issue d'une glande endocrine ou d'une cellule nerveuse et véhiculant jusqu'aux récepteurs cellulaires des informations en provenance du système de commande et de régulation neuroendocrinien.

Hypoxie : état d'insuffisance d'apport en oxygène.

Intervalle : voir délai ou latence.

K_{φ}: constante d'efficacité.

Lactate : gros ion négatif provenant de la dégradation incomplète des glucides, en particulier lors de la glycolyse anaérobie.

Lactatémie : concentration sanguine de l'ion lactate.

Latence : voir délai.

Lipolyse : processus métabolique de dégradation des lipides.

Mitochondrie : organite intracellulaire équipant tous les tissus métaboliquement très actifs comme les cellules musculaires à l'origine de l'essentiel de la production d'ATP.

MKS : système international d'unités.

Myosine : molécule protéique constituant avec l'actine l'essentiel de l'axe contractile de la cellule musculaire.

Osmotique : qui a trait à la pression exercée de part et d'autre d'une membrane biologique semi-perméable du fait d'une inégalité des concentrations ioniques ou moléculaires.

PCr : abréviation de phosphocréatine.

PCVA : abréviation de protocole croissant à une variable alternée. Protocole original et puissant mis au point par l'ASTB pour optimiser individuellement et scientifiquement les choix matériels, techniques et stratégiques et les performances.

Période : durée minimale nécessaire à une fonction pour reprendre la même valeur.

PFK : abréviation de Phospho-Fructo-Kinase, l'un des enzymes clés de la glycolyse.

pH : cologarithme, $\log(1/[H^+])$, de la concentration d'une solution en protons (ions hydrogène libres, H^+) ; le pH du sang artériel est voisin de 7.4 au repos.

Phosphagènes : terme générique désignant l'ensemble des différentes molécules porteuses d'un ou plusieurs radicaux phosphates (en particulier ATP et PCr) et servant de réservoir énergétique spécialisé pour les cellules vivantes.

Phosphocréatine (PCr) : molécule riche en énergie participant de façon explosive à une re-synthèse de l'ATP lors d'une augmentation brutale de la dépense énergétique.

Pliométrie : activité motrice généralement brève ou explosive caractérisée par une phase concentrique précédée d'une phase excentrique mettant en jeu la résistance élastique des tissus de soutien (force passive) et le réflexe myotatique.

Proton : noyau de l'atome d'hydrogène présentant une charge positive, H^+, responsable de l'acidité du milieu.

PSVA : abréviation de protocole stable à une variable alternée.

Puissance ($\dot{W}$) : quantité d'énergie par unité de temps (débit), généralement exprimée en watts ou en $kcal.min^{-1}$, éventuellement en équivalents de consommation d'O2, $l.min^{-1}$ ou $ml.min^{-1}.kg^{-1}$.

QR : abréviation de quotient respiratoire.

Quotient respiratoire (QR) : rapport du débit de dioxyde de carbone (CO2) expiré sur le débit d'oxygène (O2) consommé pendant le même temps.

Rendement : rapport de la quantité d'énergie restituée au milieu extérieur sur la quantité d'énergie dépensée correspondante exprimée dans les mêmes unités.

Rectangulaire (exercice) : caractérise la forme d'un exercice continu, de puissance stable, débuté brutalement selon un échelon de puissance et terminé brutalement par un échelon de puissance inverse.

SDH : abréviation de Succino-Déshydrogénase ; l'un des enzymes clés du cycle tricarboxylique de Krebs et représentatif du potentiel métabolique oxydatif.

Sympathique : qui se rapporte au système neuroendocrinien de commande du même nom et dont les transmetteurs chimiques terminaux sont la noradrénaline et l'adrénaline.

Systolique : qui se rapporte à la contraction du muscle cardiaque ; la systole ventriculaire débute par la fermeture des valvules auriculo-ventriculaires et s'achève par celle des valvules sigmoïdes aortiques et pulmonaires.

Transition aéro-anaérobie : zone d'astreinte énergétique caractérisée au niveau des espaces circulatoire et musculaire en activité par un équilibre des débits de production et d'élimination du lactate et une stabilité des concentrations moyennes correspondantes.

Tension : force exercée par la paroi d'un organe creux comme un vaisseau (contenant) opposée à la pression exercée par les liquides ou les gaz qu'il contient (contenu).

Travail (W) : quantité d'énergie (E) délivrée sous forme mécanique exprimée en kilocalorie (kcal) ou en Joule (J).

Triangulaire (exercice) : caractérise la forme d'un exercice de « charge » linéairement croissante en fonction du temps. Lorsque la charge représente la dépense énergétique, on parle de triangulaire « vrai » en opposition avec « faux » dont la croissance de vitesse (puissance ou cadence) s'accompagne d'une croissance de DE de type puissance.

$\dot{V}E$: abréviation de débit expiratoire ; s'exprime en litres par minute ($l.min^{-1}$) dans les conditions corporelles de température, de pression et de saturation (BTPS).

$\dot{V}O2$: abréviation de consommation d'oxygène ; s'exprime en litres par minute ($l.min^{-1}$ ou $ml.min^{-1}.kg^{-1}$) dans les conditions corporelles standard de température, de pression et de saturation (STPD).

$\dot{V}O2m$ ($\dot{V}O2max$) : abréviation de consommation maximum d'oxygène.

Volémie (ou volhémie) : volume sanguin total plasmatique et globulaire.

$\dot{V}O2t$ ($\dot{V}O2trans$) : abréviation de consommation transitionnelle d'oxygène moyenne correspondant au niveau métabolique de la transition aéro-anaérobie.