LE DÉVELOPPEMENT DES QUALITÉS PHYSIQUES AU COLLÈGE : QUAND ? COMMENT ? POURQUOI ?

2. Les aspects énergétiques

Raphaël LECA, Agrégation interne Programme 2009, octobre 2008, Dijon
raphael.leca@wanadoo.fr
www.culturestaps.com

ARTICULATION DES 2 CM (LECA – ASSADI)

- G.Cometti : « *L'individu comporte une structure qui se met en jeu, en mobilisant de l'énergie* ».

Structure

- Leviers
- Articulations
- Muscles

Energie

ATP
= seule énergie utilisable par la cellule musculaire

→ Métabolisme anaérobie alactique
→ Métabolisme anaérobie lactique
→ Métabolisme aérobie

LE MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE : RAPPEL SUR LES FILIÈRES DE PRODUCTION D'ÉNERGIE

- ATP = seule énergie chimique utilisable par les protéines contractiles pour produire de l'énergie mécanique (mouvement).

$$ATP \xleftrightarrow[ATPases]{} ADP + Pi + \text{énergie}$$

- Problème = réserves d'ATP très faibles ≈ 5 mmol/kg de muscle frais (→ détente verticale).
- Il existe des mécanismes qui permettent de resynthétiser de l'ATP à partir d'autres sources d'énergie :
  - **La filière anaérobie alactique,**
  - **La filière anérobie lactique,**
  - **La filière aérobie.**

LE MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE : RAPPEL SUR LES FILIÈRES DE PRODUCTION D'ÉNERGIE

I. La filière anaérobie alactique

= sans oxygène et sans production de lactate à partir des réserves intramusculaires de phosphocréatine (PC)

Capacité	Puissance	Délai d'intervention	Récupération	Exemples dans les APSA
Très faible = pour un effort maximal, les réserves de PC sont épuisées en moins de 10 sec.	**Très importante** (80 à 90 fois les dépenses de repos) = chez l'homme sédentaire : 9-10 W/kg chez le sprinter : 15-20 W/kg chez la femme sédentaire : 7-8 W/kg chez la sprinteuse : 12 W/kg	**Immédiat** = disponibilité dès le début de l'exercice (cette filière ne dépend pas d'une longue série de réactions)	**Très rapide** = 50% des réserves d'ATP-PC sont reconstituées après 30 sec., et 100% après 3 min. (si suffisamment d'oxygène est disponible)	**Efforts très courts et très intenses** Sprints courts Sauts Lancers Haltérophilie + au début de toute activité musculaire

LE MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE : RAPPEL SUR LES FILIÈRES DE PRODUCTION D'ÉNERGIE

I. La filière anaérobie lactique

= sans oxygène et avec production de lactate à partir du glycogène musculaire ou du glucose sanguin (dans le cytoplasme de la cellule)

Capacité	Puissance	Délai d'intervention	Récupération	Exemples dans les APSA
Faible = à cause de la baisse du pH cellulaire. Elle est proportionnelle à la concentration max. de lactate tolérée : <u>sédentaires</u> : 14-17 mmol/l de sang soit environ 75 kJ <u>ht niveau</u> : jusqu'à 30 mmol/l soit environ 150 kJ	**Importante** = environ 8-9 W/kg pour un effort de 30 sec., et 6-7 W/kg pour un effort d'une min. (Medbo et Tabata, 1989)	**Très rapide** = il faut quelques secondes (< 5 sec.) pour que la puissance maximale de ce métabolisme soit atteinte	**Assez rapide** = elle consiste à retrouver les valeurs de repos d'acide lactique c-a-d 1 à 2 mmoles/l de sang. Cette récupération n'est pas linéaire : 50% d'élimination après 15 min., et 100% après 1 h	**Efforts max. de 30 sec. à 2 min.** 400 m en athlé. km en cyclisme sur piste 100 m en natation

LE MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE : RAPPEL SUR LES FILIÈRES DE PRODUCTION D'ÉNERGIE

I. La filière aérobie

= avec oxygène (cycle de Krebs – chaîne respiratoire) à partir des glucides, des lipides, et dans certains cas des protéines

Capacité	Puissance	Délai d'intervention	Récupération	Exemples dans les APSA
Importante = la durée de l'effort dépend de son intensité (exprimée en % de VO_2max) et du niveau d'entraînement du sujet → de 5 à 10 min. (à VO_2max) à plusieurs heures (exercice sous-maximal aérobie)	**Limitée** = elle est liée à la consommation max. d'oxygène (VO_2max)à laquelle correspond la puissance maximale aérobie (PMA) : homme non sportif : 45 ml/min/kg (2) soit environ 3 W/kg femme non sportive : 35 ml/min/kg soit environ 2,5 W/kg	**Ralenti** = plusieurs min. après le début d'un ex. d'intensité moy. pour atteindre un état stable de consommation d'O_2 (entre 3 et 5 min. pour atteindre la puissance max.) Et environ 30 min. pour atteindre la puissance max. à partir de l'oxydation des lipides =lipolyse	**Longue** = elle consiste en la reconstitution des stocks de glycogène → de 12 à 72 heures selon la durée et l'intensité de l'effort	**Efforts de moyenne et de longue durée** Courses de demi et de fond en athlétisme Marathon Triathlon Cyclisme sur route Aviron Ski de fond Marche

LE MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE : RAPPEL SUR LES FILIÈRES DE PRODUCTION D'ÉNERGIE

Attention

→les trois filières ne se succèdent pas strictement, elles se chevauchent

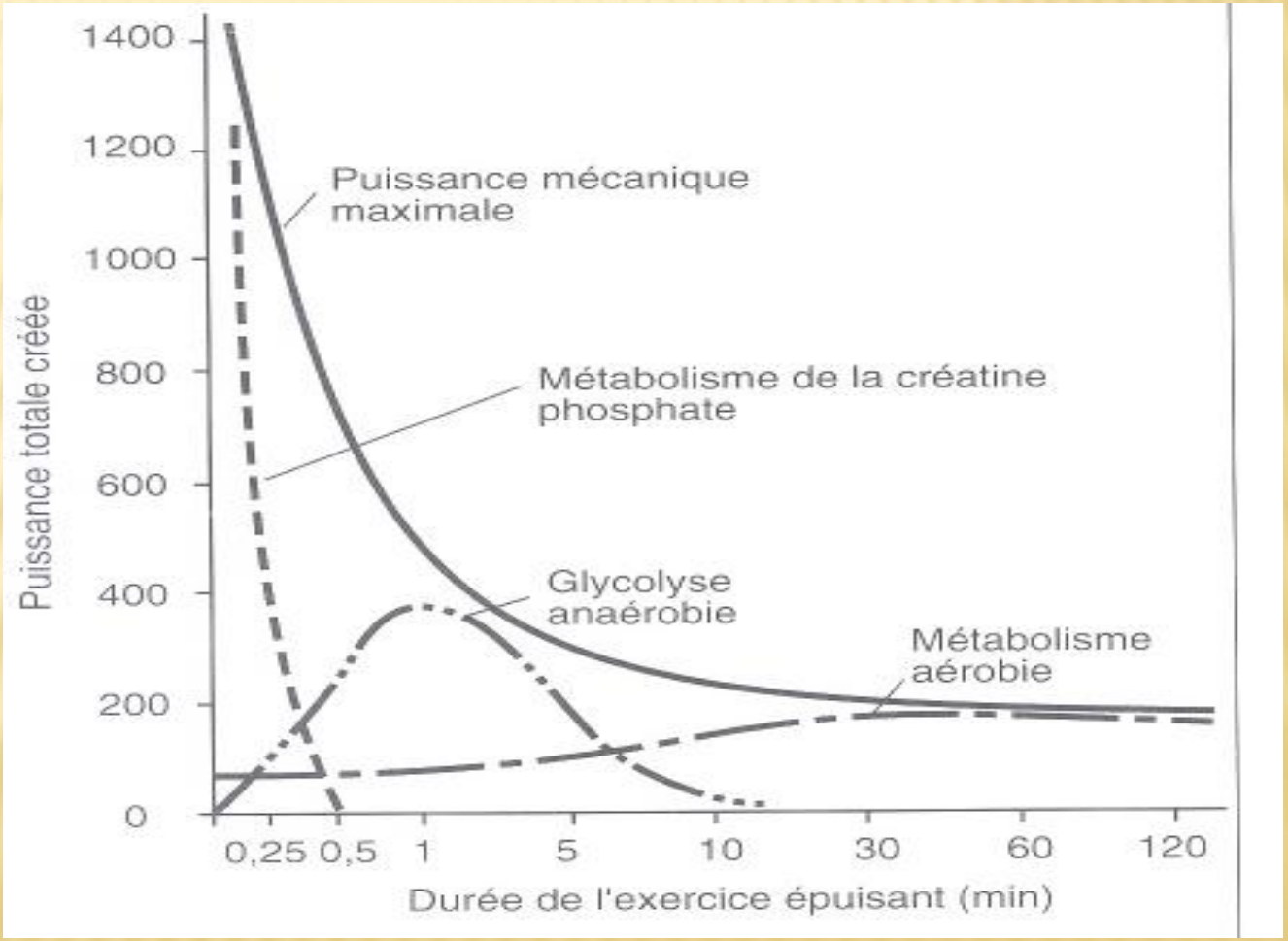
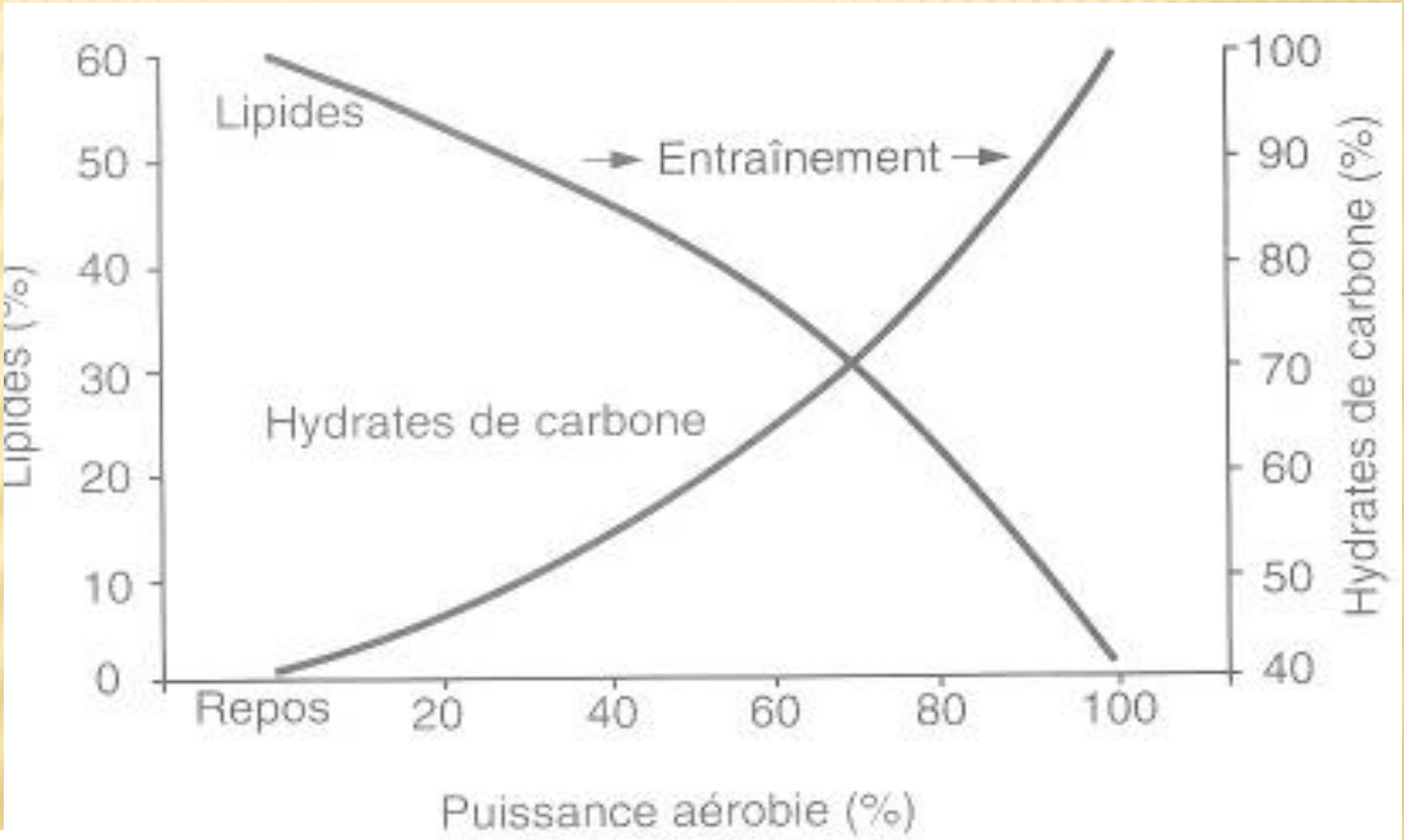


Schéma de Howald (1974)

LE MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE : RAPPEL SUR LES FILIÈRES DE PRODUCTION D'ÉNERGIE

Attention

→L'utilisation des substrats (glucide, lipide, protéine) dépend de l'intensité de l'ex.



Mobilisation des substrats selon la puissance de l'exercice (V.Billat, 1998)

QUALITÉS PHYSIQUES : DÉFINITION

- Selon R.Manno « *les capacités motrices ou qualités physiques constituent le présupposé ou pré-requis moteur de base, sur lequel l'homme et l'athlète construisent leurs propres habiletés techniques* »
  (Les bases de l'entraînement sportif, Ed.Revue EPS, Paris, 1992).

- Selon J.Weineck « *Les qualités physiques représentent le matériau de base des coordinations* »
  (Biologie du sport, Vigot, Paris, 1992).

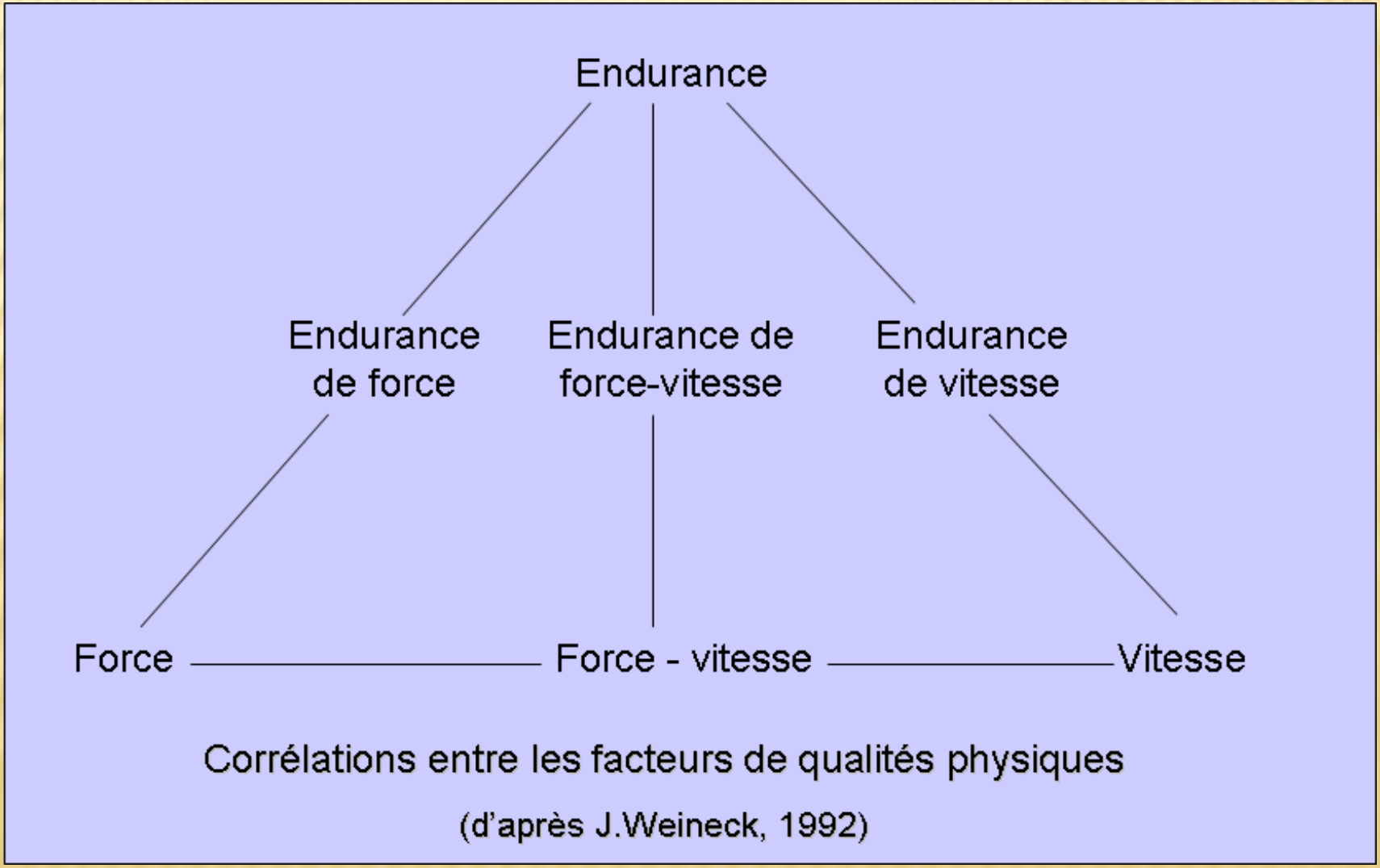
QUALITÉS PHYSIQUES : CLASSIFICATION

- R.Manno (1992) distingue trois grands types de capacités motrices :
  - **Les capacités conditionnelles** se fondent sur l'efficience métabolique des muscles et des appareils : la **force**, la **résistance** et la **vitesse.**
  - **Les capacités de coordination** sont déterminées par l'aptitude à organiser et à régler le mouvement.
  - **Les capacités intermédiaires** : la **souplesse** et la **vitesse de réaction simple.**

QUALITÉS PHYSIQUES : CLASSIFICATION

- J.Weineck (1992) distingue deux grands types de qualités physiques :
  - Les facteurs dépendant principalement de la **condition physique** (et des processus énergétiques) : l'**endurance**, la **force** et la **vitesse**.
  - Les facteurs dépendant principalement de la **coordination** (et des processus de contrôle du système nerveux) : la **souplesse** et l'**habileté**.

QUALITÉS PHYSIQUES : INTERRELATIONS



Corrélations entre les facteurs de qualités physiques

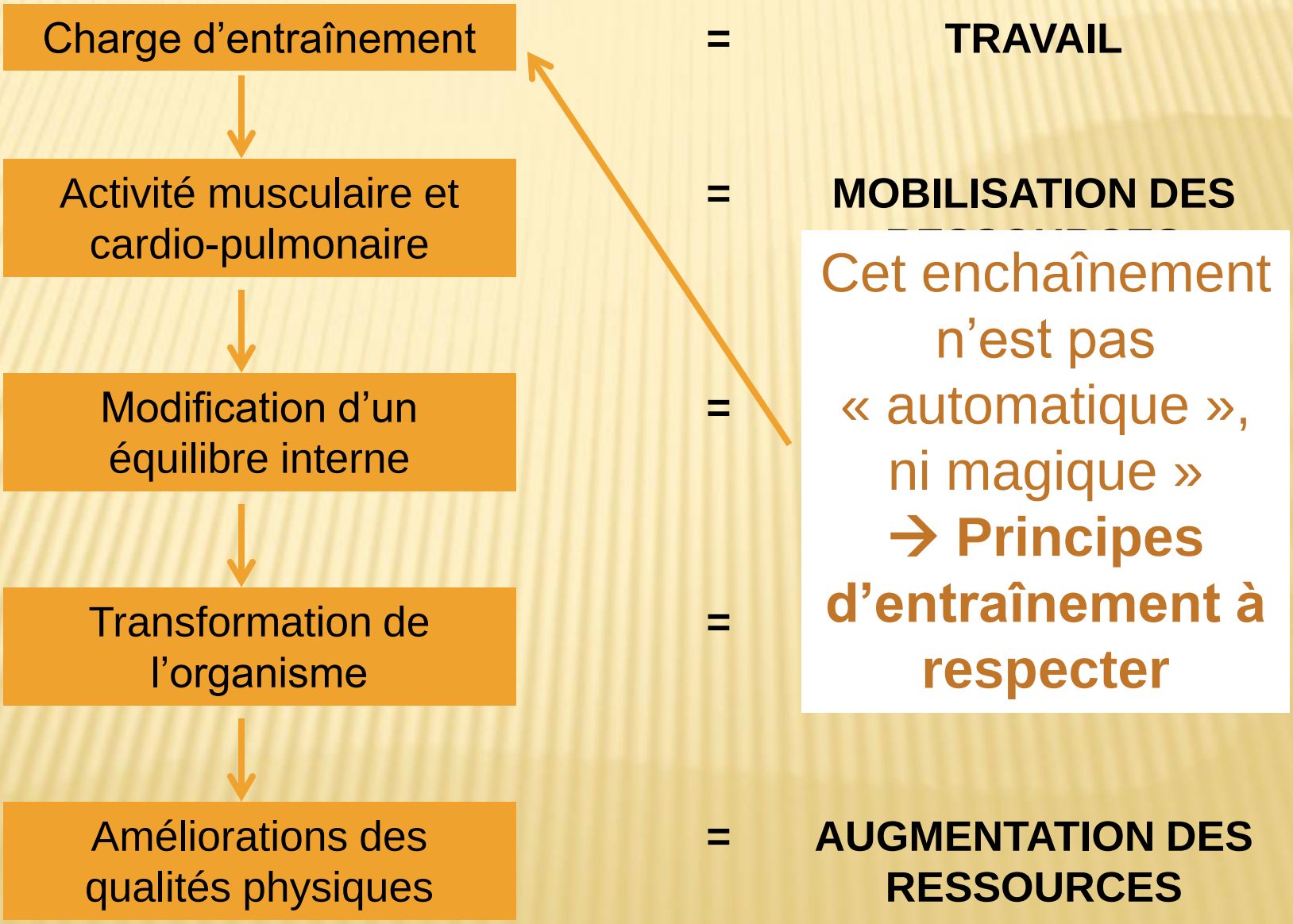
(d'après J.Weineck, 1992)

ENTRAÎNEMENT : DÉFINITION

- G.Cazorla : « C'est la somme des exercices adaptés, à intensité *progressivement croissante, qui aboutissent par des modifications biologiques, physiques et techniques à la réalisation de la plus haute performance possible* ».

  Physiologie appliquée à l'activité physique, in Manuel de l'éducateur sportif. Préparation au Brevet d'Etat, 8ème édition, Vigot, Paris, 1989.

ENTRAÎNEMENT : DÉFINITION



LES PRINCIPES D'ENTRAÎNEMENT

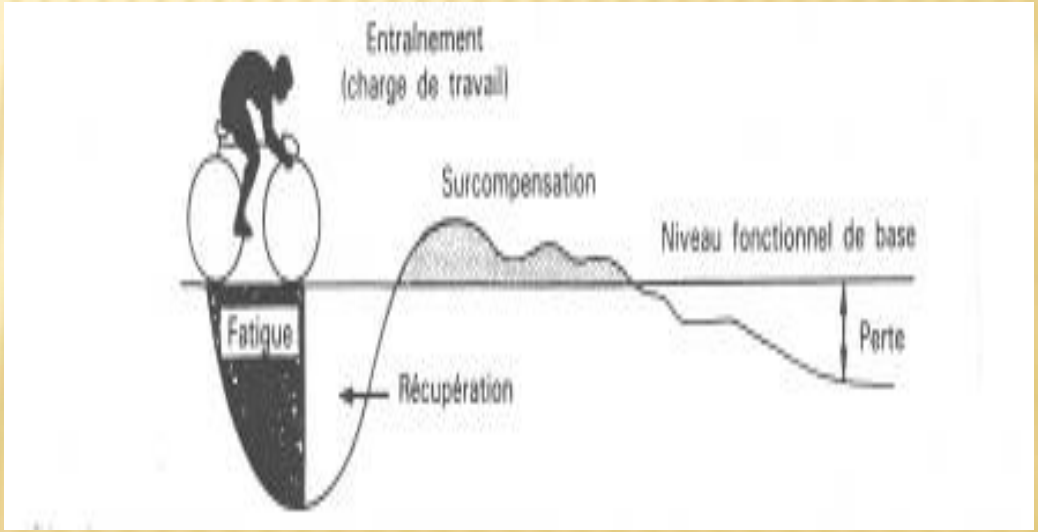
1. **Principe d'efficacité de la charge d'entraînement ou principe de surcharge** = la charge d'ent. doit dépasser un certain seuil pour provoquer une amélioration des perf. Sans charge suffisante en durée et/ou en intensité, pas de perturbation, donc pas d'adaptation de l'organisme.

   - Pour développer la puissance d'un processus énergétique, il faut produire des efforts dont l'intensité atteint ou dépasse l'intensité maximale du processus, mais pendant des durées inférieures à la durée maximale que ce processus est capable de soutenir.
   - Pour développer la capacité d'un processus énergétique, il faut produire des efforts dont l'intensité est inférieure à l'intensité maximale du processus, mais pendant des durées supérieures pour le développement de la puissance.

→ ***Exemples pour le métabolisme anaérobie alactique***
→ ***Exemples pour le métabolisme aérobie***

LES PRINCIPES D'ENTRAÎNEMENT

2. **Principe de la charge d'entraînement continue (ou principe de réversibilité)** = régularité dans la succession des charges pour obtenir une sommation d'adaptations. En cas d'intervalles trop longs entre chaque entraînement, les « traces » laissées par les sollicitations précédentes disparaissent (→ retour au niveau de départ, voire régression).



LES PRINCIPES D'ENTRAÎNEMENT

3. **Principe de la charge d'entraînement croissante** = la charge d'ent. ne doit pas rester au même niveau, mais elle doit évoluer pour continuer à perturber l'organisme malgré ses adaptations (difficulté = trouver le bon rythme d'évolution).

4. **Principe de la spécificité des charges d'entraînement** = l'entraînement doit être spécifique :
   - **À l'enfant ou l'adolescent** : âge, niveau de dév., capacités, niveau physique, motivation (→ principe d'individualisation).
   - **À l'APSA** : respect de sa logique interne et des contraintes qui l'organisent (→ situations authentiques).
   - **À la qualité ou aux qualités à développer** : par exemple sur le plan énergétique → puissance ou capacité lactique, puissance maximale aérobie ou endurance aérobie (seuil ventilatoire)…

LES PRINCIPES D'ENTRAÎNEMENT

5. **Principe de la périodicité des charges d'entraînement** = structuration du temps autour de périodes (microcycle, mésocycle, macrocycle). Avec des temps de travail intense ou en volume, d'entretien des qualités, de préparation aux compétitions importantes, de récupération active..

   Remarque : ce principe concerne sans doute moins l'enseignement de l'EPS, même si la succession des APSA enseignées s'organise également en cycles + vacances…

PERFORMANCE OBTENUE DANS UNE ACTIVITE DE LONGUE DUREE (performance aérobie)

CAPACITE DE MAINTENIR LA VITESSE MOYENNE DE COURSE LA PLUS ELEVEE

ENDURANCE AEROBIE
= fraction de VO_2max pouvant être maintenu

CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGENE (VO_2max)

RENDEMENT MECANIQUE
= coût énergétique de la course

VITESSE MAXIMALE AEROBIE

QUALITES ANAEROBIES

CAPACITES DE THERMO-REGULATION

GESTION DES RESSOURCES (choix d'une allure)

FACTEURS MOTIVATIONNELS (acceptation de l'effort)

LES COMPOSANTES DE LA CHARGE D'ENTRAÎNEMENT

- 3 grands paramètres à ajuster (M.Pradet, 1996) :
  - **L'intensité de travail** : % de VMA après un 1er test → Léger-Boucher (1980), Léger-Lambert (1982), Brue (1985), TUB II de Cazorla (1990), 30/30 de Gacon-Assadi (1990).
  - **La quantité de travail** :
    - Durée de chaque répétition
    - Nombre de répétitions
    - Éventuellement nombre de séries.
  - **La récupération**
    - Durée.
    - Intensité.
    - Nature : active ou passive.

LA NOTION D'ENDURANCE

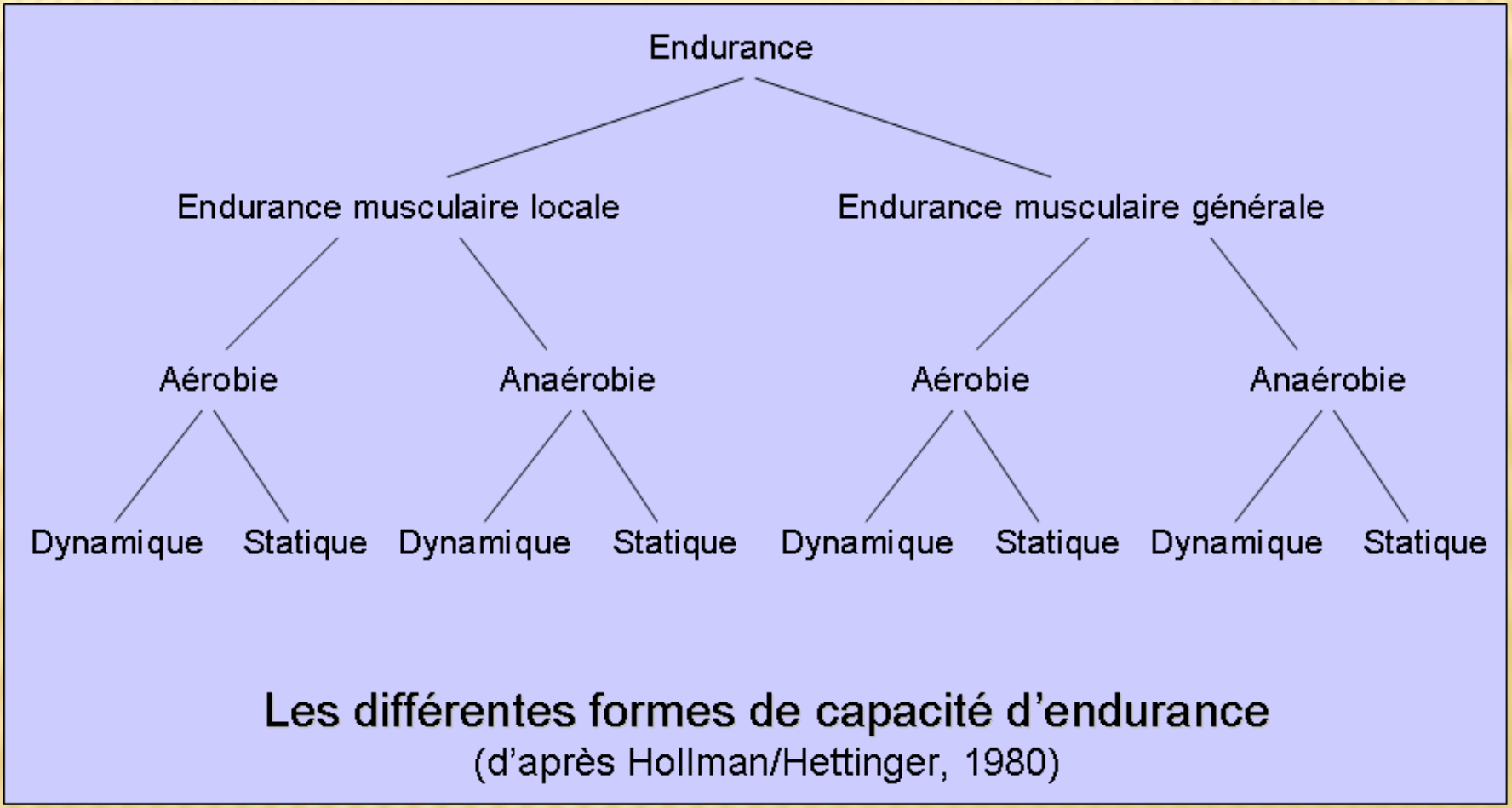
- L'endurance est considérée comme la « *faculté d'effectuer pendant longtemps une activité quelconque sans qu'il y ait une baisse de son efficacité* » (Zatsiorsky, Les qualités physiques du sportif, Culture physique et sport, Moscou, 1966),

…ou encore comme la « *capacité psycho-physique du sportif de résister à la fatigue* » (J.Weineck, Manuel d'entraînement, Vigot, Paris, 3e édition, 1990).

LA NOTION D'ENDURANCE

- … ou comme « *la faculté d'exprimer une motricité d'intensité quelconque pendant le plus longue durée possible* » (M.Pradet, La préparation physique, INSEP, Paris, 2001).
- … et pour G.Gacon (1998), « *l'endurance renvoie à la notion de fatigue repoussée et au temps limite sans cesse dépassé* ».
- → l'endurance intéresse tous les systèmes énergétiques à l'origine de la contraction musculaire, et ne se réduit donc pas uniquement aux faibles intensités d'effort.

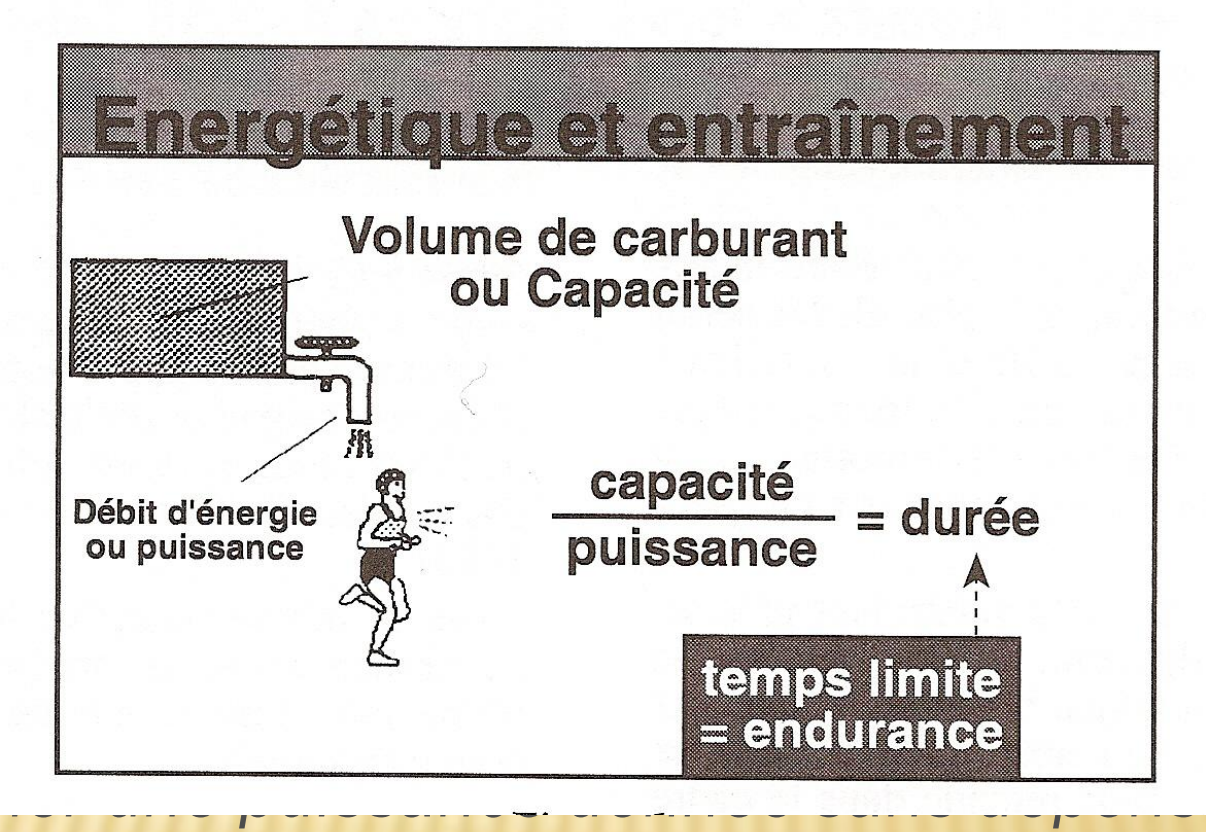
LES FORMES DE L'ENDURANCE



Les différentes formes de capacité d'endurance
(d'après Hollman/Hettinger, 1980)

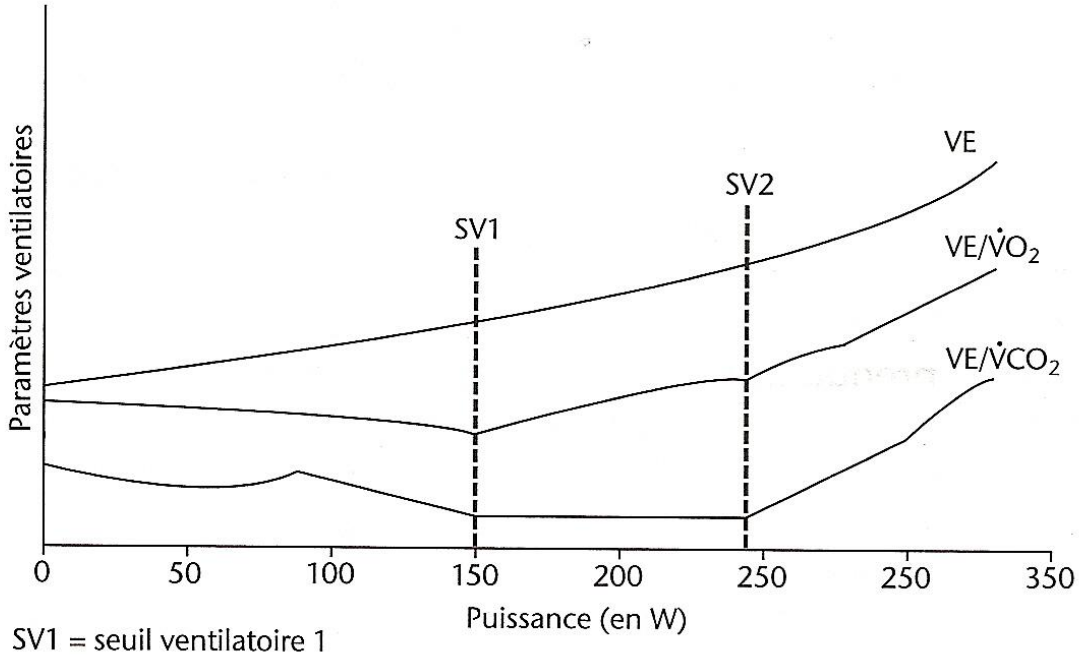
L'ENDURANCE : LES NOTIONS DE PUISSANCE ET DE CAPACITÉ

- La puissance énergétique est la quantité d'énergie utilisable par unité de temps (elle s'exprime par exemple en Watts).
- La capac énergie qu'il est mple en Joules ou
- Mais « *la énergéti pacité énergéti*
- C'est pou *de faire fonctionn er une certaine quantité d'énergie ce qui signifie qu'il est quasiment impossible de les dissocier en pratique* » (*ibid.*).

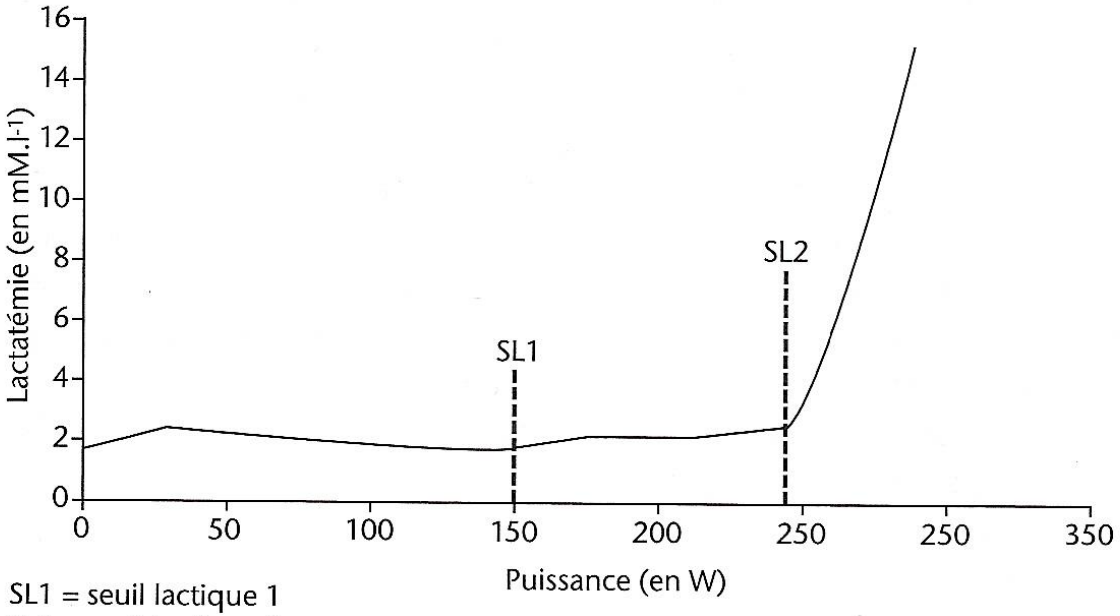


L'ENDURANCE AÉROBIE

- Lorsqu'on parle d'endurance dans le langage courant, on parle généralement d'endurance aérobie.
- L'endurance aérobie peut se définir comme la capacité d'utiliser un pourcentage le plus élevé possible de sa consommation maximale d'oxygène sur une durée la plus longue possible.
  - Elle dépend surtout de l'intensité à partir de laquelle la contribution du métabolisme anaérobie à la fourniture d'énergie augmente rapidement, avec une augmentation marquée des concentrations sanguines en acide lactique (lactatémie).
  - Cette intensité correspond aux **seuils ventilatoires 1 et 2 (SV1 et SV2), et aux seuils lactiques 1 et 2 (SL1 et SL2)** → terminologie aujourd'hui recommandée par la Société française de médecine du sport (2000).



SV1 = seuil ventilatoire 1
SV2 = seuil ventilatoire 2 (ou seuil de décompensation de l'acidose métabolique)



SL1 = seuil lactique 1
SL2 = seuil lactique 2

Seuils ventilatoires et seuils lactiques

G.Millet, Endurance et performance sportive, in L'endurance, Ed. Revue EPS, Paris, 2006.

ÉVOLUTION DE L'ENDURANCE AÉROBIE CHEZ L'ENFANT ET L'ADOLESCENT

- Les résultats sont contradictoires :
  - Reybrouck et aol. (1985) décrivent une diminution du % de VO_2max au seuil ventilatoire entre 5 et 18 ans (75% de VO_2max à 5 ans et 55% de VO_2max à 17 ans).
  - Kanaley & Boileau (1988) montrent que le seuil ventilatoire de l'enfant pré-pubère est en moyenne de 68.8% de VO_2max, contre 58.5% de VO_2max chez l'adulte (Kanaley, Boileau, 1988).
  - Washington et al. (1988) observent eux des valeurs du seuil ventilatoire indépendantes de l'âge.

PEUT-ON AMÉLIORER L'ENDURANCE AÉROBIE PAR L'ENTRAÎNEMENT ?

- L'endurance aérobie est un facteur susceptible d'être fortement modifié par un entraînement adéquat (Londeree, 1997).
  - L'endurance aérobie semble en effet être plus sensible aux influences de l'entraînement que la consommation maximale d'oxygène, pour laquelle l'entraînabilité est généralement moindre.
  - Le facteur clé est l'intensité à laquelle s'effectue l'entraînement → intensité au seuil ventilatoire pour les sujets sédentaires, voire au-dessus pour les sujets entraînés.

PEUT-ON AMÉLIORER L'ENDURANCE AÉROBIE EN ÉDUCATION PHYSIQUE ET SPORTIVE ?

- Pour E.Van Praagh & L.Léger (1999), concernant l'endurance aérobie, « *des adaptations bénéfiques peuvent être obtenues relativement rapidement* ». Il s'agit pour eux d'une qualité qui doit, par excellence, être enseignée à l'école.
- Pour Berthoin, Baquet, et Léger (2008), l'entraînement de l'endurance aérobie, chez l'enfant, est optimale au-dessus du seuil, et non strictement au niveau du seuil.

LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE

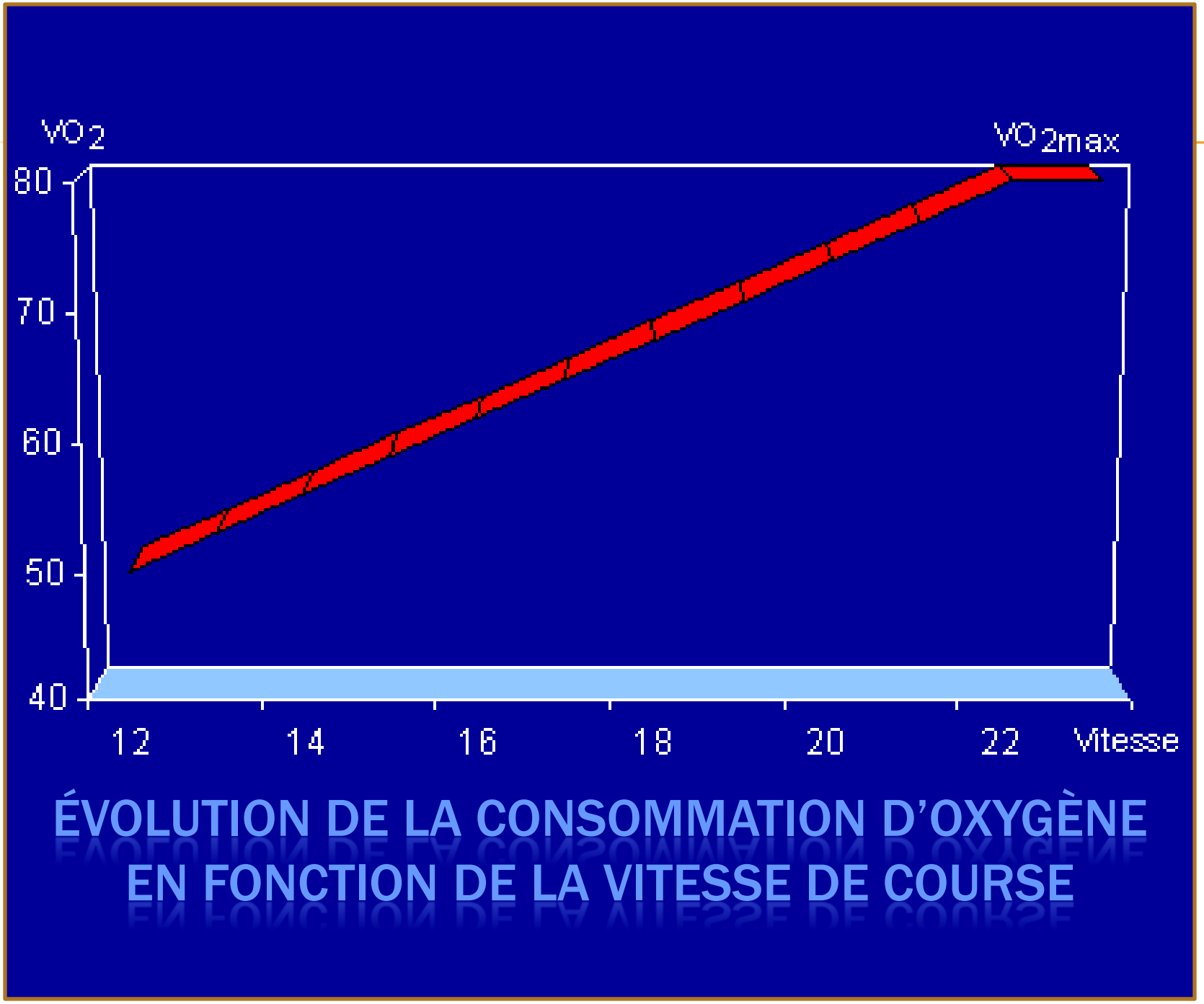
- **La consommation maximale d'oxygène** (le VO_2max) est la quantité maximale d'oxygène qu'un individu peut consommer par unité de temps dans des conditions d'exercice qui sollicitent totalement son système cardiovasculaire.
- Elle dépend des possibilités de **prélèvement** (au niveau pulmonaire), de **transport** (au niveau cardiovasculaire), et d'**utilisation** (au niveau musculaire) de l'oxygène nécessaire aux oxydations.
- En valeur absolue, elle s'exprime en ***l/min,*** et en valeur relative, elle s'exprime en ***ml/min/kg*** *(rapportée au poids corporel).*

CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE ET ENDURANCE AÉROBIE

- **La consommation maximale d'oxygène** exprime la puissance du métabolisme aérobie. Selon les individus, elle peut être maintenue entre 6 et 12 min. (notion de durée limite à VO_2max, V.Billat, 1998).

- **L'endurance aérobie** exprime le rapport entre une capacité et une puissance = la durée maximale de l'effort est d'autant plus élevé que l'intensité de l'exercice est faible, et inversement.

  = un individu endurant est celui qui, à VO_2max et coût énergétique du déplacement équivalents peut maintenir une vitesse de déplacement plus longtemps qu'un autre.



ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'OXYGÈNE EN FONCTION DE LA VITESSE DE COURSE

VO_2MAX, PMA ET VMA

- A VO_2max correspond :
  - une puissance exprimée en Watts → la **Puissance Maximale Aérobie (PMA)** = *puissance de travail maximale que le sujet développe à VO_2max ;*
  - une vitesse de déplacement exprimée en km/h → **la Vitesse Maximale Aérobie (VMA)** = vitesse limite du sujet lorsqu'il a atteint VO_2max (ou plus petite vitesse de course pour laquelle VO_2 est maximal).

VALEURS DE CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE

- Les valeurs moyennes sont de :
  - **chez l'homme** : 3 l/min soit environ 45-50 ml/min/kg.;
  - **chez la femme** : 2-2.5 l/min soit environ 35-40 ml/min/kg.
- Les valeurs maximales sont de :
  - **chez l'homme** : 5,5 l/min soit environ 90 ml/min/kg (p = 60 kg).
  - **chez la femme** : 4 l/min soit environ 75 ml/min/kg (p = 50 kg).

EVOLUTION DE VO_2MAX CHEZ L'ENFANT ET L'ADOLESCENT

- **Exprimé en valeur absolue**, VO_2max augmente de façon continue et régulière de 5 à 17-18 ans chez les garçons, et de 5 à 14-15 ans chez les filles (Berthoin, Baquet, Léger, 2008).
- VO_2max absolu d'un enfant de 5-6 ans est d'environ 1.0+-0.4 l/min^{-1}, pour aller jusqu'à 3.0+-0.4 $l.min^{-1}$ vers 16 ans chez les garçons et 2.0+-0.3 $l.min^{-1}$ chez les filles (Falgairette, 1989).
  - C'est l'augmentation des dimensions corporelles qui expliquent surtout les variations de VO_2max absolu.
  - Attention toutefois car ce mode d'expression (valeur absolue) ne renseigne pas sur les performances aérobies d'un individu. C'est pourquoi il est nécessaire de rapporter le VO_2max absolu à la masse corporelle pour obtenir des $mlO_2.kg^{-1}.min^{-1}$.

EVOLUTION DE VO_2MAX CHEZ L'ENFANT ET L'ADOLESCENT

- **Exprimé en valeur relative**, VO_2max évolue pas, ou très peu, de 5 à 18 ans et se situe chez les garçons sédentaires autour de 45-50 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ (Falgairette, 1989).
- Chez les filles, on observe des valeurs similaires à celles des garçons jusqu'à la puberté, puis une diminution du VO_2max relatif pour ne représenter que 38-40 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ à l'âge adulte.
  - Explication 1 = une masse grasse plus importante chez les filles (mais une différence, certes moindre, subsiste quand même quand on exprime VO_2max par rapport à la masse maigre : Kemper et al., 1989).
  - Explication 2 = un taux d'hématocrite plus élevé chez les garçons que chez les filles, et donc une plus grande capacité de transport de l'oxygène (Dallman et Siimes, 1979).
  - Explication 3 = un niveau d'activité supérieur chez les garçons que chez les filles (mais difficile à mesurer).

AUTRES CARACTÉRISTIQUES DU MÉTABOLISME AÉROBIE CHEZ L'ENFANT ET L'ADOLESCENT

- Chez l'enfant, l'activité enzymatique oxydative est égale ou supérieure à celle de l'adulte : l'activité de la SDH (enzyme du cycle de Krebs) serait supérieure à celle de la PFK et permettrait de compenser l'activité glycolytique restreinte.
- De nombreuses études concluent à une utilisation supérieure des lipides chez l'enfant lors d'exercice au même % de VO_2max (Martinez et Haymes, 1992).
- La dette en oxygène est inférieure chez l'enfant par rapport à l'adulte (Flandrois, 1976).
- En début d'exercice, l'ajustement de la consommation d'oxygène aux besoins en énergie est plus rapide chez l'enfant que chez l'adulte. Le délai mis pour atteindre la consommation maximale d'oxygène est de 2 min chez l'enfant contre 4 à 5 min chez l'adulte (R.Flandrois, 1988).

AUTRES CARACTÉRISTIQUES DU MÉTABOLISME AÉROBIE CHEZ L'ENFANT ET L'ADOLESCENT

- Chez l'enfant, le seuil ventilatoire est observé à un plus haut niveau de VO_2max que chez l'adulte → le seuil ventilatoire de l'enfant pré-pubère est en moyenne de 68.8% de VO_2max, contre 58.5% de VO_2max chez l'adulte (Kanaley, Boileau, 1988).
- Par ailleurs, il peut arriver que les paramètres physiologiques restent stables alors que les performances sur des efforts de moyenne et de longue durée s'améliorent → explication = diminution du coût énergétique de la course, c-a-d plus grande efficacité du mouvement (Daniels & Oldridge, 1971).
- Les possibilités de récupération post-exercice de courte, moyenne et longue durée sont sup. chez l'enfant (P.Duché, S.Ratel, 2008).
- En revanche, « *l'enfant a un déficit de thermorégulation dans des environnements extrêmement chauds ou froids* » (P.Duché, 2008), c'est pourquoi en ambiance chaude, il est important de veiller à une bonne hydratation.

Résumé sur le métabolisme aérobie chez l'enfant et l'adolescent

- Les voies énergétiques mettant en jeu les réactions oxydatives sont tout à fait opérationnelles dès le plus jeune âge = le métabolisme aérobie semble performant dès la petite enfance.
- Avant la puberté, les mécanismes aérobies sont supérieurs à ceux de l'adulte et compensent donc en partie les processus anaérobies encore immatures.
- Chez l'enfant, la part du métabolisme aérobie sur la fourniture totale d'énergie est plus importante que chez l'adulte, l'atteinte d'un état stable de consommation d'oxygène est plus rapide, la dette d'oxygène est plus faible, la participation des lipides à l'effort est plus importante, et la récupération post-exercice plus rapide.
- Les études montrent une amélioration des performances chez l'enfant et l'adolescent après un entraînement de type aérobie.
- Les améliorations portent à la fois sur la consommation maximale d'oxygène et sur l'endurance aérobie, mais les effets sont plus sensibles sur l'endurance aérobie.
- La première période de la puberté est une période sensible au cours de laquelle l'organisme est particulièrement réceptif aux efforts aérobies de moyennes et de longues durées : « *La puberté, particulièrement dans sa 1ère phase, représente la période où l'entraînabilité des déterminants de la condition physique est maximale »* (J.Weineck, 1992).
- Mais comme chez l'adulte, le désentraînement engendre une diminution du potentiel acquis.
- J.Weineck (1992) : « *Il faut porter une attention toute particulière au développement de l'endurance chez l'enfant* » car « *c'est l'entraînement de l'endurance qui a, et de loin, la plus grande influence sur tous les paramètres de la capacité de performance de l'organisme* » + protection de la santé + capacité de résistance à la fatigue.

LE MÉTABOLISME ANAÉROBIE ALACTIQUE CHEZ L'ENFANT ET L'ADOLESCENT

- Les réserves intramusculaires d'ATP et de PC ne diffèrent pas chez l'enfant, l'adolescent ou l'adulte (Lundberg et al., 1979).
- L'activité enzymatique de la filière anaérobie alactique est fonctionnelle très tôt → l'étude de Berg et al. (1986) montre que l'activité de la créatinekinase (CK) n'évolue pas avec l'âge, et qu'il n'existe aucune corrélation entre l'activité de cette enzyme et les stades pubertaires.
- Pour autant, les performances réalisées lors d'activités de type anaérobie alactique sont d'autant plus élevées que l'enfant avance en âge → sur bicyclette ergométrique, la puissance max. développée est en moyenne de 6 Watts/kg entre 7 et 8 ans, 8.6 Watts/kg entre 11 et 12 ans, et 10.2 Watts/kg entre 14 et 15 ans (Falgairette et al., 1993).
- Trois hypothèses peuvent expliquer cette aug. avec l'âge (Boisseau, 2008):
  - Développement de la masse maigre (Mercier et al., 1992).
  - Meilleure capacité d'activation neuromusculaire (recrutement des unités motrices).
  - Meilleure coordination intra et intermusculaire.
  - Meilleure stockage-restitution d'énergie.

LE MÉTABOLISME ANAÉROBIE ALACTIQUE CHEZ L'ENFANT ET L'ADOLESCENT

- La filière anaérobie alactique ne présente pas de limitation chez l'enfant et l'adolescent et doit être sollicitée très tôt et de manière suffisante

  → « *La métabolisme anaérobie n'est pas limité chez l'enfant pour des durées d'exercice inférieures à 10-15 secondes. Ainsi, toutes les activités explosives prisées par l'enfant et l'adolescent doivent être favorisées : sauts, lancers, sprints… Dans ces pratiques, quand elles sont répétées, la fatigue semble moins importante chez l'enfant et sa récupération apparaît plus rapide* »

  N.Boisseau, *Adaptations métaboliques à l'exercice chez l'enfant et l'adolescent*, in Physiologie du sport, enfant et adolescent, sous la direction d'E.Van Praagh, De Booeck, Bruxelles, 2008.

LE MÉTABOLISME ANAÉROBIE LACTIQUE CHEZ L'ENFANT ET L'ADOLESCENT

- Il existe chez l'enfant et le jeune adolescent une immaturité du fonctionnement de la glycolyse due notamment à une plus faible activité des enzymes clés du métabolisme anaérobie lactique → selon Eriksson et al. (1973) l'activité de la PFK et de la LDH est trois fois plus faible chez l'enfant de 11-13 ans par rapport à l'adulte

  + des réserves de glycogène réduites (Eriksson et Saltin, 1974).
- Cette activité glycolytique évolue proportionnellement avec la maturation pubertaire → l'étude de Haralambie (1982) ne montre pas de différence d'activité des enzymes clés de la glycolyse entre des adolescents ayant terminé leur maturation sexuelle par rapport à l'adulte.
- On observe chez l'enfant des concentrations inférieures de lactate (Rotstein et al., 1986). La production maximale de lactate est maturation-dépendante (Ratel et al., 2002) → on observe une corrélation entre les niveaux de testostérone plasmatique et les niveaux post-exercice de lactate (Mero, 1988).

LE MÉTABOLISME ANAÉROBIE LACTIQUE CHEZ L'ENFANT ET L'ADOLESCENT

- Les efforts anaérobies provoquent chez l'enfant une élévation 10 fois plus grande des catécholamines (adrénaline et noradrénaline) que chez l'adulte (Lehmann et col., 1980).
- → selon J.C.Vollmer (1990), « *les activités qui sollicitent prioritairement la force ou la capacité anaérobie ne sont pas indiquées pour l'enfant* » (même si J.Weineck (1992) postule lui que « *l'entraînement de la force peut se faire à toutes les étapes du développement* »).
- → avant la puberté, il est préférable d'éviter les efforts sollicitant prioritairement la filière anaérobie lactique (glycolyse anaérobie), not. en capacité, c-a-d les distances entre 200 et 800 m (les valeurs de lactate restent très élevées après 30 min de repos, Klimt et col., 1973).
- → ces efforts pourront être progressivement introduits à partir de la fin du collège.

LE MÉTABOLISME ANAÉROBIE LACTIQUE CHEZ L'ENFANT ET L'ADOLESCENT

- Pour autant, l'activité glycolytique peut être améliorée chez l'enfant et l'adolescent entraînés régulièrement (Mero, 1988).
- Et des travaux plus récents remettent en cause cette idée d'une immaturité de la filière anaérobie lactique chez l'enfant : selon Bar-Or (1995), il n'y a pas d'argument scientifique laissant préjuger des conséquences néfastes sur la santé des enfants d' un exercice de type anaérobie lactique.
  - Par exemple, l'observation de taux de lactate sanguins plus faibles chez l'enfant serait surtout liée à la mise en jeu de masses musculaires moins grandes que chez l'adulte (Petersen et al., 1999).
  - Par ailleurs, « *dans le contexte de l'école, les charges d'exercice demandées ne peuvent amener à l'épuisement des réserves en glycogène* » (Baquet, Berthoin, Ratel, 2006).

Résumé sur le métabolisme anaérobie chez l'enfant et l'adolescent

- « *Les enfants ne présentent pas de limitation métabolique à l'exercice bref et intense* » (Baquet, Berthoin, Ratel, 2006).
- L'enseignant pourra, surtout au collège, multiplier les répétitions d'efforts explosifs (sprints, sauts…), d'autant que les capacités de récupération sont importantes.
- « *Durand le premier et le second stade scolaire, l'entraînement de la vitesse doit s'orienter vers la vitesse de réaction, la capacité d'accélération tout comme vers la vitesse de coordination, mais pas vers l'endurance-vitesse, car les effort de ce type ne sont pas adaptés à la faible capacité anaérobie lactique et peuvent provoquer des réactions « antiphysiologiques » dans l'organisme (Hollmann et Hettinger, 1980)* » (J.Weineck, 1992).
- Donc « *les exercices d'une durée comprise entre 15 secondes et 1-2 minutes peuvent être, chez l'enfant prépubère, susceptibles d'activer des voies métaboliques encore immatures* » (Boisseau, 2008).
  Attention donc à ce type d'effort, notamment en classe de 6^{e}-5^{e}.
- Néanmoins, cette question de l'immaturité de la filière anaérobie lactique est soumise à controverses (Bar-Or, 1995).
- Dans le doute, même si une amélioration des performances liées à la glycolyse anaérobie est possible à tout âge, l'enseignant veillera à introduire ce type d'effort très progressivement à partir de la fin du collège.

PEUT-ON AMÉLIORER LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE PAR L'ENTRAÎNEMENT ?

VO_2max est-il entraînable ?

- Selon Kemper et van de Kop (1995), 50 à 70% des différences interindividuelles du VO_2max s'expliquent par la variabilité génétique.
  - Cette variabilité génétique s'exerce sur le niveau basal de VO_2max.
  - Ainsi que sur l'effet dose/réponse à l'entraînement (= entraînabilité)

PEUT-ON AMÉLIORER LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE PAR L'ENTRAÎNEMENT ?

VO_2max est-il entraînable chez les enfants et les ado ?

- G.Falgairette, P.Obert, P.Duché (1993), après étude de la littérature, montrent que l'aug. de VO_2 max par l'entraînement aérobie se situe entre 0 et 40% chez l'enfant et l'adolescent, aug. qui peut être observée dès 10-12 ans, mais « *dont les variations les plus importantes s'observent à l'adolescence* ».
- Chez les enfants, après revue de la littérature (22 études), Baquet et al. (2003) concluent que :
  - L'amélioration moyenne est de l'ordre de 10%.
  - L'intensité de l'exercice proposé semble être le facteur déterminant les augmentations de VO_2max : l'enfant devrait s'entraîner à une intensité au minimum sup. à 80% de VO_2max pour observer des progrès, mais une intensité entre 90 et 120% semble être optimale.

PEUT-ON AMÉLIORER LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE PAR L'ENTRAÎNEMENT ?

La notion de période sensible

- La notion de période sensible suppose qu'à certaine période du développement de l'enfant et de l'adolescent, il existerait des fenêtres temporelles au cours desquelles l'organisme est particulièrement réceptif à certaines sollicitations du milieu.
- Selon J.Weineck (1992), il existerait une période sensible du dév. de la consommation maximale d'oxygène durant la première phase de la puberté (11/12 ans filles ; 12/13 ans garçons) : « *le dév. de l'endurance est optimale durant la première phase de la puberté* » et « *c'est à cet âge que seront construites les bases de la capacité de perf. ultérieure* ».
- Le moment propice se situerait autour de la phase de croissance rapide.(K. Kobayashi, 1978).

PEUT-ON AMÉLIORER LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE EN EPS ?

- En rappelant que l'influence de l'exercice est plus sensible sur l'amélioration de l'endurance aérobie que sur VO_2max, E.Van Praagh & L.Léger (1999) soulignent que « *VO_2max n'est pas significativement améliorée par l'EPS ''traditionnelle'' ».*
- C.Hausswirth & D.Lehénaff (1997) observent une augmentation de 5 % de la VMA avec une classe de 3e de 33 élèves sur 12 séances.
- M.Gerbeaux et coll. (1998) observent une augmentation de 0,5 km/h de la VMA sur 6 séances et 1km/h sur 12 séances.

PEUT-ON AMÉLIORER LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE EN EPS ?

- H.Assadi et al. (1998) ont comparé trois études pour évaluer les progrès possibles au cours d'un cycle de travail à VMA :
  - Collège Les Epontots, Le Creusot, 1987 → augmentation de 1,44 km/h de la VMA sur 7 semaines avec une classe de 6e.
  - Lycée Naval de Brest, 1989 → augmentation de 1km/h de la VMA sur 10 séances avec des élèves dont l'âge moyen est de 21.5 ans.
  - Collège J.Prévert de Châlons en Champagne, 1990-1995 → augmentation moyenne comprise entre + 0.7 km/h (4e filles) et + 1.2 km/h (6e garçons) sur 7 séances auprès d'un échantillon de 1000 élèves âgés de 11 à 17 ans.
  - → « *Les progrès en VMA s'échelonnent entre 0.7 et 1.4 km/h. Finalement, dans les conditions d'un travail scolaire, c-a-d une séance hebdomadaire, on note une progression moyenne de l'ordre de 1 km/h* ».

LES CONDITIONS POUR AMÉLIORER LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE EN EPS

- Herrera Cazenave & O.Bessy (1993) proposent 5 conditions à respecter :
  1. une définition de l'activité (trait. didactique) qui induit la poursuite simultanée d'objectifs de développement, d'attitude et de méthode,
  2. un mode d'entrée en cohérence avec les représentations des élèves et leurs motifs d'agir (→ défis personnels à partir d'un test initial, variété des formes de travail, méthode par intervalles, visualisation des vitesses de course, formes collectives…),
  3. **des charges de travail adaptées et qualitatives (respect d'une intensité de travail comprise entre 80 et 110% de la VMA et d'un volume de séance proche de la distance parcourue lors du test),**

LES CONDITIONS POUR AMÉLIORER LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE EN EPS

- Herrera Cazenave & O.Bessy proposent 5 conditions à respecter :

4. une stratégie d'enseignement efficace (sur la base d'une pédagogie du projet ou du contrat permettant de renseigner régulièrement les élèves sur leurs progrès et de les impliquer activement dans leur projet de course),
5. et une programmation originale (cycles longs de 12 séances, couronnement du travail avec un cross d'établissement, transversalité d'une APSA à l'autre en recherchant la supplémentarité des effets physiologiques).

LES CONDITIONS POUR AMÉLIORER LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE EN EPS

- dimensionnaliser l'intensité (= niveau de sollicitation des ressources bioénergétiques) des tâches (J.P.Famose, 1983), de façon à contraindre suffisamment les systèmes physiologiques de production d'énergie (égale ou sup. à VMA).

- individualiser cette intensité de travail grâce à un ou plusieurs tests (début de cycle, milieu de cycle) de VMA (Léger, Brue, Cazorla, Gacon & Assadi), → l'intensité se règle ensuite en % de VMA individuel.

- éventuellement parfaire cette individualisation par un test de Temps limite à VMA (V.Billat, 1998) car le temps de maintien de VMA (et donc de VO_2max) varie de 6 à 11 min. selon les sujets.

  → Protocole = échauffement de 15-20 min. à 60% de la VMA. Puis en 20 sec., atteindre sa VMA et la maintenir le plus longtemps possible. La durée obtenue correspond au temps limite à VMA et VO_2max.

LES CONDITIONS POUR AMÉLIORER LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE EN EPS

- en raison de la pénibilité lié à l'effort physique concevoir des modalités d'enseignement variées et originales :
  - Propositions de Gouju (1993) qui proposent un mode d'entrée dans l'activité course d'endurance autour des 4 sources de dissonance de Berlyne (1970) : la nouveauté, la surprise, la complexité et le conflit.
  - Propositions de Delaveau & Mirabel (2005) qui proposent une alternance de formes de travail **en continu** (par ex. 20 min. à 80-85 % de VMA), et de formes de travail **par intervalles ou intermittent** (par ex. « long-long » type 3 min. à 90-100% de VMA, ou « court-court » type 30 sec. À 95-110% de VMA). Le cycle de 11 séances présentent des thèmes variés : tests de VMA et de temps de soutien à VMA, connaissance et maîtrise des allures (régularité), sollicitation du temps de soutien à VMA, performance collective sur une distance donnée, relais classiques…
- favoriser la participation volontaire de tous = **dédramatiser** l'effort (en l'adaptant aux ressources de chacun, même les élèves déjà en surpoids), **masquer** l'effort (en l'associant à des tâches surajoutées), **faire apparaître** les conséquences de l'effort (en termes de progrès grâce à des critères contrôlables par l'élève lui-même), **apprivoiser** l'effort (par un travail autour de la gestion de l'effort).

LES CONDITIONS POUR AMÉLIORER LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE EN EPS

- proposer des cycles d'enseignements suffisamment longs = 10 à 12 séances (D.Delignières, 2001).
- profiter des périodes sensibles du développement pour programmer les cycles sollicitant prioritairement la filière aérobie pendant la période pubertaire : « *l'âge d'or du dév. de VO_2max se situe entre 10 et 15 ans* » (Gacon, Assadi, 1990).
- entretenir ensuite les effets sur *VO_2max* par une programmation cohérente des cycles d'APSA = rechercher la transversalité pour éviter aux « traces » adaptatives laissées par les efforts aérobies de se « perdre » sur la durée : « *une fois le cycle terminé, il ne faut pas oublier d'entretenir les capacités acquises, sinon elles chutent rapidement en cas de non sollicitation* » (Gacon, Assadi,1990) → principe d'une « *cohérence interactive des cycles* » (M.Delaunay, C.Pineau, 1989).

LES CONDITIONS POUR AMÉLIORER LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE EN EPS

- ne pas réserver à la course de durée le statut d'activité bioénergétique : envisager un mode d'entrée énergétique (traitement didactique) pour d'autres APSA = sports collectifs, natation, course d'orientation, vélo tout terrain, musculation, sports de combat, sports de raquette, etc.

  → voir exemple de programmation de F.Lab (1996).

- faire de tout échauffement une occasion pour solliciter la filière aérobie (= routiniser, dans l'activation cardio-pulmonaire démarrant toutes les séances d'EPS, une période d'effort aérobie).

- **→ l'amélioration de VO_2max doit être attaquée sur plusieurs fronts, et ne peut être réservée à un seul cycle d'enseignement dans l'année.**

QUELQUES CITATIONS QUI MÉRITENT D'ÊTRE RETENUES

« La perturbation, la contradiction constituent l'élément moteur du développement et des apprentissages »

Jean Piaget, 1987.

« Pour optimiser le développement corporel et sportif des enfants et des adolescents, il est indispensable d'avoir quelques connaissances fondamentales sur les particularités physiques et psychiques de l'enfant à chaque étape de son développement »

J.Weineck, 1992.

QUELQUES CITATIONS QUI MÉRITENT D'ÊTRE RETENUES

« Les stimuli liés au mouvement ou à une charge de travail sont une nécessité physiologique pour le développement psychophysique optimal des enfants et des adolescents. Tous les systèmes de l'organisme se développent de manière optimale lorsque les stimuli sont adéquats, c'est à dire s'ils sont appliqués suffisamment tôt, au moment opportun, et s'ils sont durables »

J.Weineck, 1992.

Puissance du processus alactique

Intensité de l'effort	Durée de l'effort	Durée de la récupération	Nature de la récupération	Quantité de travail
Égale ou supérieure à l'intensité maximale absolue.	De 3 à 7 s. Possibilité de balayer toute la gamme des durées d'effort en organisant le travail en « pyramide ».	De 1 à 3 min en fonction de la durée des efforts.	Semi-active pour maintenir la vigilance neuro-musculaire sans créer de fatigue supplémentaire.	De 6 à 12 répétitions. Interrompre le travail dès qu'apparaît une baisse de l'intensité.

Capacité du processus alactique

Intensité de l'effort	Durée de l'effort	Durée de la récupération	Nature de la récupération	Quantité de travail
90 à 95 % de l'intensité maximale, ce qui se traduit par « le plus vite possible » en conservant relâchement et maîtrise.	De 7 à 15 s. Possibilité de balayer toute la gamme des durées d'effort en organisant le travail en « pyramide ».	De 3 à 8 min en fonction de la durée des efforts.	Active (trot, marche) pour permettre une élimination plus aisée des déchets produits et favoriser la quantité de travail.	De 4 à 6 répétitions. Interrompre le travail dès qu'apparaît une baisse trop marquée de l'intensité.

Puissance du processus aérobie : efforts intermittents de longue durée

Intensité de l'effort	Durée de l'effort	Durée de la récupération	Nature de la récupération	Quantité de travail
Compris entre 95 et 110 % de la PMA.	De 2 à 3 min.	De 2 à 3 min également. Alternance de durées d'effort et de récupération identiques.	Active, pour favoriser le maintien des apports d'oxygène.	Pour une séance entièrement organisée autour de cette méthode, 5 à 6 répétitions au minimum.

Puissance du processus aérobie : efforts intermittents de moyenne durée

Intensité de l'effort	Durée de l'effort	Durée de la récupération	Nature de la récupération	Quantité de travail
Compris entre 105 et 120 % de la PMA.	Autour de 1 min d'effort.	De 2 à 3 min. La récupération peut aller jusqu'au triple du temps d'effort.	Active, pour favoriser le maintien des apports d'oxygène.	Pour une séance entièrement organisée autour de cette méthode, 8 à 10 répétitions au minimum.

Puissance du processus aérobie : efforts intermittents de courte durée

Intensité de l'effort	Durée de l'effort	Durée de la récupération	Nature de la récupération	Quantité de travail
Compris entre 115 et 130 % de la PMA.	Autour de 15 s d'effort.	De 1 à 2 min. La récupération peut aller jusqu'à 6 à 8 fois le temps d'effort.	Active, pour favoriser le maintien des apports d'oxygène.	Pour une séance entièrement organisée autour de cette méthode, 12 à 15 répétitions au minimum.

Puissance du processus aérobie : court/court

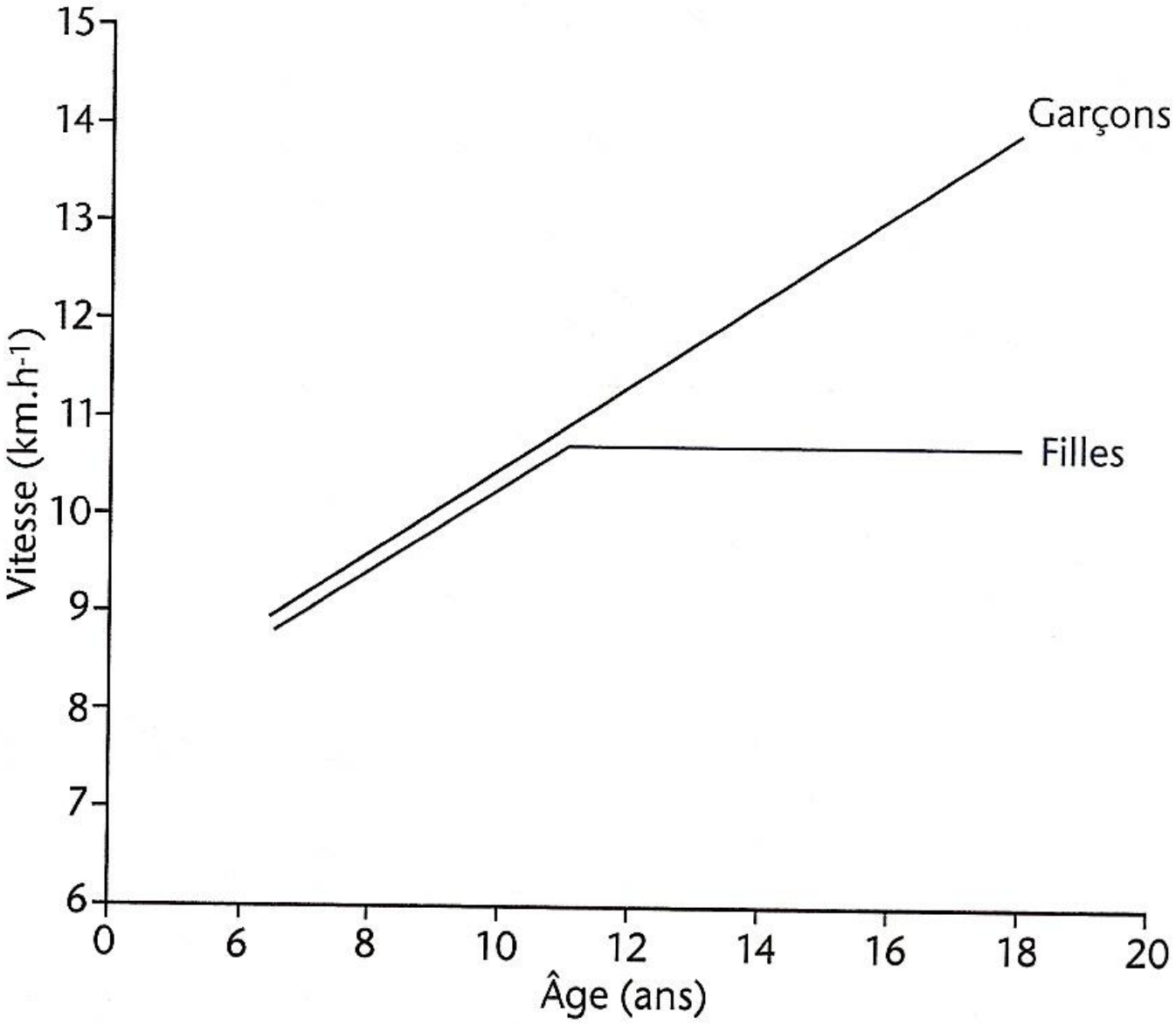
Intensité de l'effort	Durée de l'effort	Durée de la récupération	Nature de la récupération	Quantité de travail
Compris entre 90 et 105 % de la PMA.	De 15 à 30 s.	De 15 à 30 s. Dans ces exercices qui s'effectuent par séries enchaînées, les séquences d'effort et de récupération sont de durées équivalentes.	Active, pour favoriser le maintien des apports d'oxygène.	Dans une même séance, 2 à 3 séries d'efforts et de contre-efforts alternés d'une durée de 6 à 10 min, entrecoupées d'une récupération d'un temps équivalent.

Capacité du processus aérobie : efforts continus d'intensité élevée

Intensité de l'effort	Durée de l'effort	Durée de la récupération	Nature de la récupération	Quantité de travail
Compris entre 80 et 85 % de la PMA.	De 20 à 30 min.	Pas de récupération, mais une possibilité d'alternance de périodes d'efforts élevés et de périodes d'intensité plus faible (fartlek*).		

Capacité du processus aérobie : efforts continus d'intensité moyenne

Intensité de l'effort	Durée de l'effort	Durée de la récupération	Nature de la récupération	Quantité de travail
Compris entre 70 et 75 % de la PMA.	De 30 à 45 min.	Pas de récupération, mais une possibilité d'alternance de périodes d'efforts élevés et de périodes d'intensité plus faible (fartlek).		



Evolution de la vitesse maximale aérobie (VMA) en fonction de l'âge pour les garçons et les filles entre 6 et 18 ans.

Les tests d'évaluation de VMA

- **Test de Léger-Bouchet (1980)** : il s'agit de suivre la vitesse rythmée par une bande sonore pré-enregistrée (incrémentation de 1km/h toutes les 2 min à partir de 8 km/h). A chaque son, il faut être positionné au niveau de l'un des repères placés tous les 50m le long d'une piste de 400m. L'épreuve est interrompue lorsque le coureur ne parvient plus à suivre la vitesse imposée (= n'est plus au niveau du repère). VMA correspond à la vitesse du dernier palier.
  - **l'épreuve de course navette de Léger et Lambert (1982)** : épreuve qui procède par des navettes aller-retour, entre deux plots espacés de 20 m (facilité d'utilisation mais relances constantes nécessaires).
  - **le VAM-éval de Cazorla et Léger (1992)** : même protocole que Léger-Boucher, mais la vitesse est incrémentée de 0,5 km/h toutes les mn depuis 8.5 km/h (→VMA obtenues plus précises).
- **Test de Brue (1985)** : il s'agit de suivre un « lièvre » cycliste dont la vitesse est très rigoureusement imposée (braquet et fréquence de pédalage). L'allure est augmentée de 0,25 à 0,30 km/h toutes les 30'' selon les paliers (vitesse de départ = 6,5 km/h). VMA correspond au dernier palier complété.
- **Le TUB II de Cazorla (1990)** : C'est un test intermittent à intensité progressive dont le principe est de réaliser des paliers de 3 min séparés par un intervalle de repos de 1 min. sur une piste balisée par des plots tous les 20 mètres. Le progression est de 8, 10, 12 km/h, puis 13, 14, 15, 16, 17, 18… km/h. Un retard sur 3 ou 4 plots consécutifs marque l'arrêt du test.
- **Le 30/30 de Gacon-Assadi (1990)** : alternance de séquences de travail et de séquences de repos de 30 sec. Doser son effort pour tenir au minimum 8 min. et au maximum 15

La recherche-action de F.Lab (1996)

- **Hypothèse de départ** = l'amélioration des capacités aérobies dans une pratique multiactivités est possible et cela permet l'obtention de progrès significativement supérieurs à ceux atteints en un seul cycle de course d'endurance.
- **Comparaison de 2 classes semblables sur le plan statistique** :
  - Une classe témoin → 6 séances de course de durée (travail individualisé à VMA) ;
  - Une classe expérimentale → un cycle de football et un cycle de lutte dans lesquels est intégré une travail de développement des capacités aérobies.
    - Par exemple en football = exercice en aller-retour sur le terrain. 5 attaquants ont pour but de faire progresser la balle le + vite possible pour aller marquer. 5 défenseurs, prenant leur départ 20 m derrière les attaquants, doivent intercepter le ballon avant le tir (séance n°5).
    - Par exemple en lutte = réaliser 2 séries de 10 combats de 20 sec., récupération de 20 sec. Entre les combats, 5 minutes entre les séries (séance n°2).
  - Contrôle = même test de VMA.
- **Résultats** : les progrès furent significativement plus importants pour la classe travaillant en multi-activités :
  - Classe témoin VMA + 0.34 km/h.
  - Classe expérimentale VMA + 0.56 km/h.
- **Explications** : plus grande quantité de travail + motivation (variété des situations).
- **Problème majeur** : contrôle des charges de travail et leur individualisation.
- **Attention** : forme de travail qui vient consolider un cycle de course, pas le remplacer.