

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE

FACULTE DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES
DEPARTEMENT DE L'EDUCATION PHYSIQUE ET SPORTIVE

N° d'ordre :

N° de série :

Thèse

Présentée à l'Université Mentouri de Constantine
pour l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT EN THEORIE ET METHODOLOGIE DE
L'EDUCATION PHYSIQUE ET SPORTIVE**

(OPTION : THEORIE ET METHODOLOGIE DE L'ENTRAINEMENT
ET DE L'EDUCATION PHYSIQUE ET SPORTIVE)

Soutenu le 1 septembre 2006

Par KHIAT BELKACEM

**L'APTITUDE AEROBIE DES ENFANTS
DURANT LE DEVELOPPEMENT PUBERTAIRE
SELON LE SEXE**

Jury composé de :

| | | |
|--------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Président : | Pr. ABERKANE Abdelhamid | Faculté de Médecine – Constantine |
| Rapporteur : | Pr. MEHDIOUI Hacène | Faculté de Médecine – Constantine |
| Examineurs : | Pr. GRANGAUD Jean-Paul | Faculté de Médecine – Alger |
| | Pr. BOUSAFSAF Badreddine | Faculté de Médecine – Constantine |
| | Pr. TAOUTAOU Zohra | Professeur – INFS/STS d'Alger |
| | MC. MECHICHE Ali | Maître de Conférence - UMC |

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 1 |
| CHAPITRE 1: Revue de la littérature..... | 5 |
| 1. l'Aptitude Aérobie..... | 6 |
| 1.1. définition de l'aptitude aérobie..... | |
| 1.2. aptitude aérobie et âge..... | 7 |
| 1.3. aptitude aérobie et maturation biologique..... | 9 |
| 1.4. aptitude aérobie et mesures anthropométriques..... | 12 |
| 2. Aptitude aérobie et Seuil anaérobie..... | 14 |
| 2.1. la notion de seuil anaérobie..... | 15 |
| 2.2. le seuil anaérobie chez les enfants..... | |
| 3. Aptitude Aérobie et Activité Physique..... | 16 |
| 4. Les Stades de la Puberté..... | 19 |
| 4.1. le concept de stade pubertaire..... | |
| 4.2. la classification des stades pubertaires..... | 20 |
| 4.2.1. le degré d'ossification du squelette..... | 21 |
| 4.2.2. l'âge d'éruption des dents..... | |
| 4.2.3. les caractéristiques biométriques..... | 22 |
| 4.2.4. le développement des caractères sexuels secondaires..... | |
| 5. L'Evaluation de l'Aptitude Aérobie..... | 23 |
| 5.1. les méthodes d'évaluation directes..... | 24 |
| 5.2. les méthodes d'évaluation indirectes..... | 25 |
| 5.2.1. les épreuves indirectes sous-maximales..... | |
| 5.2.2. les épreuves indirectes sur ergocycle..... | 26 |
| 5.2.3. step-test..... | 27 |
| 5.2.4. les épreuves indirectes maximales..... | 28 |
| 5.3. Importance de l'évaluation de l'aptitude aérobie dans les activités physiques..... | 31 |
| CHAPITRE 2 : Matériels et Méthodes..... | 33 |
| 1. Population..... | 34 |
| 2. Protocole expérimental..... | |
| 2.1. évaluation du stade pubertaire..... | |
| 2.2. mesures anthropométriques..... | |
| 2.3. évaluation de la consommation maximale d'oxygène..... | 35 |
| 2.4. méthodes statistiques..... | 36 |

| | |
|---|----|
| CHAPITRE 3 : Les Résultats..... | 37 |
| 1. Les Indices anthropométriques..... | 38 |
| 1.1. les indices anthropométriques des filles..... | |
| 1.2. les indices anthropométriques des garçons..... | 41 |
| 2. La Consommation Maximale d'Oxygène..... | 43 |
| 2.1. la VO2max des filles..... | |
| 2.2. la VO2max des garçons..... | 46 |
| 3. Comparaison Filles-Garçons..... | 49 |
| 3.1. comparaison des indices anthropométriques..... | |
| 3.2. comparaison des consommations maximales d'oxygène..... | 52 |
| 4. Relation VO2max / Indices Anthropométriques..... | 54 |
| 4.1. évolution corrélative de la VO2max des filles..... | 55 |
| 4.2. évolution corrélative de la VO2max des garçons..... | 59 |
| DISCUSSION..... | 63 |
| CONCLUSION..... | 74 |
| REFERENCES | |
| Résumés | |

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'enfance et l'adolescence, en tant que périodes de transition vers l'état adulte, présentent une série d'évolutions morphofonctionnelles particulièrement importantes qui jouent un rôle dans les possibilités de développement d'aptitudes physiques et psychiques. Les données recueillies sur de longues périodes montrent que la chronologie de la puberté n'est pas immuable. Des variations existent aussi d'un individu à l'autre. Elles peuvent dépendre de facteurs internes d'ordre génétique (début des pubertés familiales) ou pathologiques (liées à une maladie chronique). Des facteurs externes peuvent également intervenir : socio-économiques, sportifs, nutritionnels, géographiques (altitude). Concernant les capacités d'effort, il semble que la période pubertaire entraîne des modifications sensibles et distinctes du potentiel physique à même âge chronologique. Les types d'effort et de la capacité à fournir un effort par les enfants et les adolescents ne doivent pas être vues comme une réduction quantitative optimale de la capacité des adultes. Au contraire des adultes, les enfants et les adolescents possèdent ce que l'on appelle des phases sensibles durant lesquelles le développement optimal des principales formes d'effort peut s'effectuer à divers degrés et à divers moments.

La pratique du sport de haut niveau par les adolescents est un phénomène en pleine expansion. Le début de la pratique sportive est de plus en plus précoce chez l'enfant. Les plus motivés et les plus doués d'entre eux s'entraînent de manière intensive bien avant 10 ans. Il est parfaitement admis que l'organisme de l'adolescent présente une grande faculté d'adaptation tout particulièrement dans le domaine de la performance aérobie. De plus, c'est au cours de la puberté que l'organisme subit les plus grandes modifications morphologiques et fonctionnelles secondaires au développement du système neuroendocrinien dominé notamment par l'accroissement des hormones sexuelles et de croissance. Cette étape privilégiée s'avère être propice pour développer l'entraînement en endurance et augmenter la condition physique propre à

chaque discipline sportive. Du point de vue de la médecine sportive il faut porter une attention 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. L'importance d'orienter le programme d'entraînement de l'organisme en priorité vers le développement de la qualité d'endurance tient également au fait que c'est précisément durant l'enfance et l'adolescence que l'amélioration de la capacité d'endurance se répercute sur tous les autres facteurs responsables de la performance tels que la vitesse, l'explosivité, l'endurance-vitesse, la force, l'endurance-force et l'adresse (Weineck, 1992).

Les exigences liées au développement de ces paramètres ont largement contribué durant ces dernières années à pousser les médecins, les physiologistes et les cadres du sport à conjuguer leurs efforts et à élaborer des protocoles d'études en commun. Ce rapprochement motivé par l'intérêt de pratiquer des tests d'effort pour évaluer la condition physique de leurs athlètes a permis de définir un profil des qualités et caractéristiques des sportifs de haut niveau dans un sport donné. Ces données permettent de mieux comprendre le sport en question et d'élaborer un entraînement adapté aux qualités requises. Dans ce sens l'endurance est un déterminant essentiel de nombreuses performances sportives. C'est pourquoi sa mesure fait partie de toute évaluation des qualités physiques. Le travail de plus ou moins longue durée nécessite une énergie mécanique basée sur le métabolisme aérobie. C'est pourquoi la consommation maximale d'oxygène ou puissance aérobie représente le critère d'appréciation le plus utilisé depuis sa définition par Astrand en 1954. Ainsi l'aptitude aérobie est un indicateur significatif de la santé générale des enfants et des adolescents et considérée comme l'un des meilleurs indices de la relation santé-aptitude physique des jeunes individus (Krahenbuhl et coll., 1985).

L'orientation et l'adaptation de l'entraînement pour le développement de cette aptitude aérobie dépendra certainement des pics de croissance qui sont

différents pour les garçons et pour les filles, ces dernières arrivant à maturité plus précocement, et de facteurs héréditaires inhérents à chaque individu (6).

L'un des aspects de cette étude est de préciser les relations pouvant exister entre l'âge pubertaire, les indices morphologiques et l'aptitude aérobie. Il s'agira donc de déterminer l'âge pubertaire le plus adéquat pour entamer un entraînement en endurance (aérobie) pour chacun des deux sexes. Si la détermination des phases sensibles peut être opérationnelle, on pourra adapter la meilleure charge d'entraînement au meilleur moment, avec les meilleurs résultats sur le plan biologique, et par conséquent au niveau des performances sans porter préjudice à la croissance, au développement naturel des jeunes athlètes et à leur santé.

Le choix de deux populations l'une féminine et l'autre masculine a pour objectif de préciser les aspects communs et les différences éventuelles dans l'évolution de l'aptitude aérobie en fonction de la cinétique pubertaire. A cet effet, le but de notre travail est d'étudier l'évolution de certains paramètres morphologiques et de la consommation maximale d'oxygène durant les différents stades de la puberté. Cela nous permettra de mieux connaître l'évolution naturelle de ces indices durant ces périodes et par conséquent orienter l'entraînement en fonction du degré de maturité biologique.

CHAPITRE 1 :

REVUE DE LA LITTERATURE

1. L'Aptitude Aérobie

La capacité aérobie est un important composant de l'aptitude physique parce qu'il représente la capacité globale des systèmes cardiovasculaires et respiratoires (10,11) ainsi que l'habilité à exécuter un exercice de longue durée (Astrand et Rodahl, 1986 ; Taylor H.L. et coll., 1955).

1.1. définition de l'aptitude aérobie :

L'activité physique régulière est, sans doute, un élément important pour un développement somatique et psychique équilibré. Elle participe à l'acquisition d'un capital santé optimal au seuil de la vie adulte. Ce capital santé a pour composante essentielle une bonne aptitude aérobie que l'on peut évaluer grâce à la mesure de la consommation maximale d'oxygène. Cette dernière apporte une information concernant l'apport maximal d'énergie d'origine aérobie par unité de temps et la capacité fonctionnelle de la circulation, puisqu'il existe une très bonne corrélation entre le débit cardiaque et la puissance maximale aérobie (Rowland, 1990).

La consommation maximale d'oxygène (VO₂ max.) est généralement admise comme index de l'aptitude aérobie (Astrand et Rodahl, 1986). Elle est définie par ces derniers comme étant la quantité la plus élevée d'oxygène mesurée au niveau de la mer pouvant être consommée (ou volume d'oxygène) par un sujet par unité de temps au cours d'un exercice musculaire maximal lorsqu'elle est rapportée au poids corporel et est exprimée en ml.kg⁻¹.min⁻¹.

Elle reflète l'état d'activité des systèmes cardiovasculaires, respiratoires, hématologiques et métaboliques qui participent à la livraison de l'oxygène et aux mécanismes oxydatifs de l'exercice musculaire (13). La magnitude de la consommation maximale d'oxygène (VO₂ max) dépend de la capacité des poumons à échanger l'oxygène entre l'air et le sang au niveau des capillaires, de la capacité cardiovasculaire à transporter l'oxygène vers les muscles et de la

capacité de ces derniers à utiliser cet oxygène. Une grande consommation d'oxygène et son utilisation reflètent les limites supérieures des possibilités du corps à fournir de l'énergie par la voie du métabolisme aérobie au niveau des muscles actifs durant un exercice de longue durée (128).

Cette aptitude correspond à la puissance maximale de resynthèse de l'adénosine tri phosphatique (ATP) dans des conditions aérobies.

Partant du fait que l'endurance aérobie est la capacité d'un individu à maintenir un pourcentage élevé de la VO₂ max. pendant une longue durée, à un niveau égal d'endurance, le sujet qui a une VO₂ max. plus élevée réalise forcément une plus grande quantité de travail, et obtient un meilleur travail mécanique total (35).

Aptitude aérobie et âge :

La puissance aérobie des enfants entraînés et non-entraînés a été souvent mesurée, et les garçons ainsi que les filles ont montré une augmentation avec l'âge chronologique (73, 128,137).

Chez les enfants la VO₂ max augmente en période de croissance lorsqu'elle est exprimée de façon absolue en l/mn, pour les filles lorsqu'elle est exprimée de façon relative au poids corporel en ml/kg/mn (106). Jusqu'à 10-11 ans il n'y a pas de différence significative entre garçons et filles pour la consommation maximale d'oxygène exprimée par référence au poids corporel ($\text{ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$), et les valeurs constatées à cet âge sont parmi les plus élevées susceptibles d'être atteintes dans le courant de la vie (101). Dans une étude Armstrong et Welsman (1994) ont analysé les données du Pic VO₂ de sujets non-entraînés âgés de 8 à 16 ans. Ils ont objectivés que le Pic VO₂ est de 13% plus élevé chez les garçons par rapport aux filles à l'âge de 10 ans (1.68 vs 1.49 l/mn) et s'accroît jusqu'à 37% à l'âge de 16 ans (3.06 vs 2.24 l/mn). La différence de Pic VO₂ entre les deux sexes chez les enfants est attribuée aux différences dans les habitudes de leurs activités physiques et à la concentration d'hémoglobine (11). Les garçons semblent physiquement plus actifs que les filles (8, 11). La différence de Pic VO₂

entre les deux sexes chez les jeunes est sans doute aussi en relation avec les variations dans la composition corporelle, les garçons faisant apparaître un pourcentage de masse maigre plus important durant les années pré pubertaires (10, 128).

Sur 10 études longitudinales recensées par Armstrong et Welsman (1996) d'Europe, du Japon et de l'Amérique du Nord les données montrent une augmentation progressive de VO₂ max des garçons entre 8 et 16 ans. Les filles connaissent une évolution similaire entre 8 et 13 ans mais à un degré moindre que les garçons. Dans le même sens Mirwald et Bailey (1986) dans une recherche longitudinale sur 22 filles âgées de 8 à 13 ans ont noté un accroissement annuel du Pic VO₂ max de 11,6 %. Toutefois plusieurs études transversales sur les filles ont relevé soit un aplatissement, soit un abaissement du Pic VO₂ entre 13 et 15 ans (39, 92, 132). D'autre part Andersen K.L. et coll. (1976 ; 1984) dans leurs études longitudinales sur les filles norvégiennes (âgées de 10,3 à 15,2 ans) et des filles allemandes (âgées de 12,7 à 15,7 ans) ont noté que le Pic VO₂ atteint sa plus haute valeur à 13,3 ans chez les norvégiennes et à 14,7 ans chez les allemandes. Krahenbuhl G.S. et coll. (1985) ont rapporté que les garçons et les filles avaient un Pic VO₂ similaire jusqu'à l'âge de 12 ans. A l'âge de 14 ans la différence dans le Pic VO₂ était de 25 % et à l'âge de 16 ans elle était de 50 %.

Ainsi les études longitudinales ayant évalué les différences entre les sexes (3,111, 132) confirment les résultats obtenus lors de recherches transversales avec toutefois des pourcentages de différences entre les sexes moins prononcés.

Les différences de Pic VO₂ entre les sexes chez les enfants et les adolescents les plus âgés sont généralement attribuées à des différences dans la concentration d'hémoglobine (11, 85).

D'une manière générale la quantité de diminution de la VO₂ max avec l'âge est affectée par la relation qui existe entre l'âge, le composant graisseux du corps, l'activité physique, la fonction cardiovasculaire (volume cardiaque maximal) et peut-être aussi les changements morphologiques tel que la

diminution de la masse musculaire (13, 53). Les quantités de diminution dans la VO2 max dans les études transversales et longitudinales varient entre approximativement 0,25 à 0,95 ml.kg.mn.année (13).

Aptitude aérobie et maturation biologique :

La maturation des enfants se caractérise par une variété de facteurs qui marquent les séquences de la croissance biologique normale. Le poids du corps et la taille sont communément reconnus comme reflétant les changements somatiques, d'autres indices représentent la croissance musculaire et osseuse (roengentographie, l'âge osseux) et la maturation sexuelle (stades pubertaires de Tanner, 1962). Les données de la croissance biologique varient beaucoup d'un enfant à un autre et la relation entre les étapes de maturation et l'âge chronologique ne sont pas souvent superposables (Rowland, 1990). D'une manière similaire les réponses physiologiques aux exercices aérobiques ou d'endurance se développent durant la croissance chez l'enfant. Dans le même temps les habiletés à la performance s'améliorent (amélioration du temps au mile) parallèlement à la croissance physiologique. La vitesse du développement biologique est généralement associée à « âge biologique » ou encore au « taux de maturation » (85).

Bien que le Pic VO2 semble être influencé aussi bien par la croissance que par la maturité, il y a relativement peu d'études qui se sont penchées sur la relation entre le Pic VO2 et la maturation.

Dans une étude faite en 1996 Armstrong et coll. classèrent 184 garçons et 136 filles selon la classification pubertaire de Tanner (1962). Les garçons les plus matures montrèrent un plus haut Pic de VO2 cela étant dû probablement, selon les auteurs, à une masse musculaire plus importante ainsi qu'à une plus grande concentration d'hémoglobine. Par contre chez les filles les différences n'étaient pas significatives. Dans une étude similaire, Neuendorf et Schwartz (1996) ont constaté que les plus hautes valeurs absolues et relatives de VO2 max des garçons étaient significatives ($p < 0,001$) en comparaison à celles des filles de

tous les groupes d'âge. Ceux qui avaient une maturation précoce avaient une consommation d'oxygène supérieure à celle des individus à maturation plus tardive. La VO₂ max relative augmente au-delà de 11,5 ans chez les filles et au-delà de 13,5 ans chez les garçons. Plus tard aucune modification notable ne sera relevée chez les garçons, tandis que la VO₂ max relative diminuera chez les filles à partir de 14,5 ans.

Par une autre approche Welsman et coll. (1994) ont mis en relief dans une étude les relations pouvant exister entre le Pic VO₂ et la testostérone chez 50 mâles âgés de 12 à 16 ans. La régression multiple a révélé que la masse corporelle, l'âge et la taille expliquaient 74 % de la variance des scores du Pic VO₂ et que les changements hormonaux n'avaient pas un rôle important dans le développement du Pic VO₂.

Kemper et Verschuur (1981) ont évalué le Pic VO₂ en relation avec l'âge osseux de 375 enfants âgés de 13 à 14 ans. L'analyse révéla que l'accroissement du Pic VO₂ parallèlement à celui de l'âge osseux était surtout dû à l'augmentation des dimensions du corps. Shephard et coll. (1978) ont étudié les données de 770 enfants des deux sexes et ont conclu que l'âge osseux n'apportait que peu de chose à la description des variables physiologiques corrélées à l'âge chronologique, à la taille et à la masse corporelle.

Par ailleurs quelques études longitudinales sur le Pic VO₂ des enfants et des adolescents ont utilisées le pic de croissance (PHV = Peak Height Velocity) comme indice de maturation (85, 88, 112). Ces études ont rapportées que l'accroissement maximal du Pic VO₂ était observé durant l'année du pic de croissance (PHV) chez les garçons et les filles ; cependant les auteurs font remarquer qu'il était important de noter que l'atteinte du pic de croissance des filles s'observe tôt durant l'adolescence et plus tard chez les garçons (Tanner, 1978).

Beunen et Malina (1988) dans une étude de la revue de la littérature concernant la croissance, la performance physique et le démarrage de l'adolescence concluent que le Pic VO₂ semblait atteindre son maximum aux environs du pic

de croissance (PHV) chez les garçons mais qu'on ne pouvait généraliser cela pour les filles.

Ainsi le développement du pic de VO₂ max semble influencé par l'interaction maturation – mesures du corps. Il existe plusieurs méthodes qui proposent une description et une évaluation complètes de la maturation durant l'adolescence néanmoins le développement des caractères sexuels secondaires, la maturité osseuse et le pic d'accroissement de la taille sont suffisants pour nous indiquer la maturité générale durant l'adolescence. L'âge osseux est utilisé comme indicateur de la maturité mais il n'apporte pas beaucoup pour la description des variables physiologiques se rapportant à l'âge chronologique, à la masse du corps et à la taille (Armstrong et Welsman, 1996). L'analyse de la valeur de l'âge dans ce contexte paraît limitée et les considérations éthiques liées à l'exposition des enfants aux rayons x doivent être prises en compte.

Des études longitudinales ont optées pour l'utilisation du pic d'accroissement de la taille pour standardiser la maturation mais les résultats doivent être interprétés avec précaution étant donné le nombre limité d'observations annuelles nécessaires pour réaliser une courbe mathématique utilisable ⁽¹³⁾. Mirwald et Bayley (1986) rapportent que l'augmentation maximale du pic VO₂ se produit durant l'année qui correspond au pic de croissance de la taille chez la majorité des garçons et des filles. Les études longitudinales montrent que chez les garçons le pic VO₂ relatif à la masse corporelle varie très peu entre 8 et 16 ans tandis que chez les filles il décroît avec l'âge.

Toutefois la relation entre le pic VO₂ et la maturation ainsi que sa liaison avec les effets partiels des mesures du corps requièrent d'autres études et d'autres approches du problème.

1.4. Aptitude Aérobie et mesures anthropométriques :

La puberté est indissociable de la croissance. Entre le premier et le dernier stade de la puberté, tous les caractères morphologiques augmentent significativement, notamment au moment du pic de croissance ^(117, 118). Les

vitesse de croissance et de maturation diffèrent parmi les enfants. Une variété de facteurs peut influencer la croissance et la maturation telles que l'héritage génétique, l'histoire nutritionnelle et l'état général de la santé. La vitesse de changement est un élément important dans l'évaluation de la croissance et du développement des diverses dimensions du corps (154). Il n'existe pas de différences de poids, de taille et de masse grasse entre les deux sexes jusqu'à l'âge de 12-13 ans, c'est-à-dire jusqu'à l'apparition de la puberté (47). La masse maigre des jeunes filles commence à tendre vers un plateau vers l'âge de 12-13 ans tandis que celle des garçons continue à évoluer jusqu'à l'âge de 18 ans. Malgré les similitudes de masse maigre avant la puberté, les jeunes filles possèdent généralement davantage de masse grasse à tous les âges, la différence la plus grande est observée après l'âge de 12 ans. La cause de ces différences est liée à la régulation des hormones sexuelles, la testostérone et les oestrogènes. La sécrétion de testostérone par les testicules, qui cesse à la naissance, reprend à la puberté. Il en résulte finalement une masse musculaire et une masse osseuse supérieure chez les garçons, ce qui crée une différence notable dans la puissance potentielle des deux sexes.

Ainsi l'influence la plus significative de la puberté se situe sur les accroissements du poids et de la stature entre 12 et 16 ans (118). Cette poussée de croissance survient en général chez les filles entre 11 et 13 ans, alors que chez les garçons elle apparaît entre 13 et 15 ans (117, 118, 153).

VO2 max. et les mesures du corps:

VO2 max. relatif à la masse corporelle reste la méthode la plus utilisée pour exprimer la consommation maximale d'oxygène (26, 90).

De nombreuses études (9, 13, 33, 34, 54, 102) ont relevé de grandes corrélations entre VO2 max. et la masse corporelle ainsi qu'avec la taille chez les enfants et les adolescents. Les recherches longitudinales ont montré que VO2 max. rapporté à la masse corporelle des garçons augmente puis chute entre 12 et 14 ans (132, 140). Par contre les données longitudinales des filles montrent sans

équivoque qu'il y a une diminution de VO₂ max. relatif au poids du corps avec l'âge (3, 24, 108). La raison de la faiblesse de VO₂ max relatif à la masse corporelle des filles est liée essentiellement à l'accumulation de la masse grasse sous-cutanée durant les années péri pubertaires (3, 18, 49).

Dans une recherche faite par Williams J. et coll. (1992), VO₂ max. corrélé au poids du corps des garçons âgés de 10 à 15 ans ont été comparés. Ainsi cette étude a montré clairement que les garçons plus âgés avaient une VO₂ max. significativement supérieure que les plus jeunes. Des résultats similaires ont été obtenus par ces chercheurs en comparant VO₂ max. à l'âge biologique. Dans le même sens Welsman et Armstrong (1992) ont comparé VO₂ max. des filles et des garçons pré pubères avec des groupes d'individus pubères et adultes. Leurs résultats confirment l'accroissement de VO₂ max de l'âge pré pubère jusqu'à l'âge adulte chez les garçons et sa diminution entre la pré puberté et la puberté chez la fille.

D'autre part Kemper (1986) a analysé des études longitudinales chez les enfants. Il a comparé les données longitudinales de VO₂ max/Poids Corporel recueillies au Canada (Mirwald et Bailey, 1985), en Allemagne (Rutenfranz J. et coll., 1982), aux Pays-Bas (Kemper, 1985) et en Norvège (Andersen K.L. et coll., 1974). À 12 ans la valeur moyenne est de 56 ml.kg⁻¹.min⁻¹ et diminue de façon marquée chez les garçons allemands, un peu moins chez les garçons norvégiens et pas du tout chez les garçons néerlandais. Pour les filles, VO₂ max/PC se situait autour de 50 ml.kg⁻¹.min⁻¹ à 12 ans pour ensuite diminuer jusqu'à la fin de l'adolescence dans toutes les études et ce de façon plus marquée que chez les garçons à l'intérieur de chacune des études.

D'une manière générale les données longitudinales relatives aux changements dans l'aptitude aérobie dus à la croissance durant le développement pubertaire sont peu nombreuses particulièrement concernant les filles (34, 91, 102).

Toutes ces données sont importantes car l'aptitude aérobie sert d'indice fonctionnel des systèmes pulmonaires, cardiovasculaires ainsi que des

composants hématologiques rentrants dans les mécanismes de livraison de l'oxygène et des mécanismes oxydatifs liés à l'exercice musculaire (11).

2. Aptitude aérobie et Seuil anaérobie :

L'enfant pré pubère se caractérise par un métabolisme aérobie relativement très développé par rapport à l'adulte. Les possibilités maximales aérobies ainsi que les activités enzymatiques musculaires de type oxydatif (enzymes du cycle de Krebs) sont égales et même le plus souvent supérieures à celles de l'adulte sédentaire. Au contraire le métabolisme anaérobie lactique est peu efficient et immature. La production de lactates au niveau musculaire et la concentration sanguine correspondante sont faibles par rapport à l'adulte (65). Les activités enzymatiques musculaires glycolytiques telles que la phosphofructokinase, l'aldolase ou la lactate déshydrogénase sont toujours plus faibles que celles de l'adulte (69). Eriksson et coll. (1974) ont montré l'existence d'une corrélation significative entre la concentration musculaire en lactate après un exercice maximal et le volume testiculaire chez les jeunes garçons âgés de 12 à 13 ans.

La puissance maximale anaérobie est toujours plus élevée chez les garçons que chez les filles (59). Rapportée au kilo de poids corporel, elle évolue parallèlement à l'âge, prouvant ainsi que la masse musculaire n'est pas seule en cause et qu'il existe bien un phénomène de maturation (Dupuis et Daudet, 2001).

La puberté est un tournant essentiel dans ce métabolisme, car la testostérone y joue un rôle fondamental en agissant sur l'augmentation de la masse musculaire et sur la maturation enzymatique. Mais la testostérone n'est pas seule à intervenir puisqu'il a été démontré qu'en entraînant des enfants pré pubères on augmente l'activité de la phosphofructokinase et on améliore leur aptitude anaérobie.

2.1. La notion de seuil anaérobie :

Le seuil anaérobie correspond au moment où le métabolisme aérobie intervenant seul lors d'un exercice sous-maximal, devient insuffisant pour poursuivre l'effort qui devient plus intense et c'est alors qu'entre en action le métabolisme anaérobie qui permet de continuer. Ce seuil a fait l'objet de très nombreuses publications (22, 59). Certains auteurs utilisent le seuil ventilatoire qui s'exprime par la cassure de la courbe de ventilation représentée par un quotient respiratoire qui devient supérieur à 1. D'autres auteurs prennent en compte, particulièrement dans les milieux sportifs, la mesure directe de l'acide lactique dans le sang en recherchant le moment où la production de lactates dépasse les capacités d'élimination. Ils retiennent soit la valeur de 2 mmoles, soit celle de 4 mmoles/litre. Les différentes méthodes de prélèvement et le moment de celui-ci (dès l'arrêt de l'effort, 1 à 2 min après) accentuent les écarts entre les résultats. C'est pourquoi certains chercheurs préfèrent parler de zone transitionnelle, ce qui rend mieux compte de la réalité puisqu'il n'y a pas de frontière nette entre l'utilisation du métabolisme aérobie et celle du métabolisme anaérobie. Ceci est encore plus vrai chez l'enfant qui produit moins de lactates du fait de l'immaturation de son métabolisme anaérobie lactique et qui les recycle mieux dans le métabolisme aérobie.

Classiquement le seuil est exprimé en pourcentage de VO_{2max} . Plus il est élevé, plus l'individu est endurant. Les valeurs moyennes se situent entre 55 et 65%. Ces chiffres sont légèrement plus élevés chez l'enfant que chez l'adulte sédentaire (22, 23).

L'entraînement peut augmenter ce seuil, permettant de maintenir une intensité d'effort plus forte (23, 28, 58).

2.2. Le seuil anaérobie chez les enfants :

Lors d'un exercice d'intensité donnée celui-ci pourra être poursuivi d'autant plus longtemps que le sujet met en jeu une fraction importante de sa filière aérobie. Un apport énergétique trop important via la filière anaérobie lactique

aura pour conséquence à cause de la production d'acide lactique et la modification du pH intracellulaire qui en résulte, de limiter la durée de l'effort. Dès lors, un moyen de mesurer la capacité maximale aérobie est de doser la lactatémie lors d'un exercice d'intensité progressivement croissante. C'est ainsi qu'on a pu montrer que pour un niveau d'intensité comparable, la lactatémie sanguine et musculaire est plus faible chez l'enfant que chez l'adulte (Eriksson, 1972). Cette constatation semble en réalité liée à une faible activité de certaines enzymes clés de la glycolyse chez l'enfant pré pubère, à savoir la phosphofructokinase et la lactate déshydrogénase (Eriksson et coll., 1974).

La lactatémie, moins élevée chez l'enfant a été constatée aussi bien après des exercices maximaux aérobies qu'après des exercices anaérobies (67, 100). Ceci s'expliquerait par une moindre concentration en testostérone, une plus faible quantité de glycogène musculaire et une concentration en catécholamines plus basse (67, 100).

L'enfant est caractérisé par une cinétique d'ajustement de la consommation d'oxygène plus rapide que celle du sujet mature et par conséquent par un déficit en oxygène moindre (58, 59).

3. Aptitude aérobie et Activité physique :

Trois facteurs influencent considérablement VO₂ max. :

- ▶ l'hérédité : les résultats des études ont démontré que la relation entre VO₂ max. et l'hérédité est souvent contradictoire. L'influence de l'hérédité varie de 0 à jusqu'à presque 100 % (36, 57, 64).
- ▶ la croissance et le développement : pendant la période de croissance, les dimensions corporelles des enfants augmentent, ce qui implique une augmentation de VO₂ max. Ces effets sont similaires à ceux obtenus à l'entraînement. Donc il est important de savoir quelle augmentation de VO₂ max. se produit chez les enfants qui ne font pas d'entraînement aérobie (68).

► l'entraînement : l'entraînement aérobie peut augmenter la VO₂ max. chez les enfants, et ce en plus des changements provoqués par la croissance et par le développement (27).

Des études ont examiné l'habileté des enfants à accroître leur VO₂ max après une période d'entraînement en endurance et suggèrent que l'effet de ce dernier est de moindre qualité que celui observé chez les adultes. Bar-Or (1989) a passé en revue plusieurs études qui ont montré peu ou pas de changement dans l'aptitude aérobie durant l'entraînement chez les enfants pré pubères, mais ces études ne satisfaisaient pas les critères usuels du type d'exercice utilisé, sa durée et l'intensité nécessaires pour accroître l'aptitude aérobie par l'entraînement chez les adultes. Quand les études sur les enfants étaient conformes aux standards d'entraînement cités précédemment plusieurs d'entre elles révèlent une augmentation de la VO₂ max d'environ 10% (Rowland, 1992). Néanmoins ce pourcentage reste inférieur à celui observé chez les sédentaires adultes (10 – 25%). L'examen des enfants athlètes d'élite en endurance montre des valeurs de VO₂ max de l'ordre de 60 à 65 ml.kg⁻¹.min⁻¹ comparées aux 53 ml.kg⁻¹.min⁻¹ des enfants non-sportifs de même âge. Par contre chez les adultes cette différence est plus importante puisque l'on trouve des valeurs de 70 à 80 ml.kg⁻¹.min⁻¹ chez les athlètes d'endurance et une moyenne de 45 ml.kg⁻¹.min⁻¹ chez les sédentaires. Ceci suggère que les athlètes adultes ont une réponse aérobie à l'entraînement plus importante cela étant peut-être simplement dû au nombre d'années important passé dans la compétition (27, 130).

D'une manière générale les garçons semblent avoir un niveau d'activité physique habituelle plus élevé que celui des filles (10, 145, 146) et cela paraît contribuer à la supériorité des valeurs du Pic VO₂ des garçons (75). Néanmoins l'évidence de la relation entre l'activité physique habituelle et le Pic VO₂ est toujours en discussion (8, 21, 89) car le problème réside dans l'évaluation précise de l'activité physique habituelle des enfants (141). Les modèles de l'activité physique courante des enfants et des adolescents indiquent qu'il y a de rares

expériences durant lesquelles on a pu associer les niveaux d'activité physique habituelle avec un accroissement du Pic VO₂ (8, 11, 133, 147).

En outre la puissance aérobie des enfants entraînés et non-entraînés a été souvent mesurée, et les garçons ainsi que les filles ont montré une augmentation avec l'âge chronologique (91). Quand les sujets sportifs et non-sportifs des deux sexes ont été comparés, les valeurs de la puissance aérobie des sujets entraînés étaient supérieures à tous les âges, avec de plus grandes différences durant l'adolescence (7, 11). Les variations de VO₂ max. absolue (Lmin⁻¹) dues à la croissance sont similaires à celles qui résultent d'un entraînement aérobie. L'évaluation d'un effet de l'entraînement durant la croissance est difficile, car le changement total observé est la somme des effets de l'entraînement, de la croissance ou du développement, et de l'interaction entre les deux. Néanmoins pour que l'entraînement durant l'enfance soit efficace et augmente le VO₂ max., il est important de tenir compte non seulement du type et du caractère de l'exercice, mais aussi de l'intensité, de la fréquence et de la durée de l'entraînement qui devraient augmenter progressivement (6, 134).

Le développement de la consommation maximale d'oxygène (VO₂ max.) chez les enfants et les adolescents a été le sujet de beaucoup d'investigations (4, 54, 67, 82, 111, 112). Quoique quelques recherches ont rapporté des augmentations de VO₂ max. résultantes de l'entraînement (66, 88, 102, 107, 125), d'autres par contre n'en ont pas constaté (20, 26, 30, 50, 90, 110, 143). Un tel manque d'amélioration de VO₂ max. a été fréquemment identifié par les études qui se sont concentrées sur la période qui précède tout juste la puberté et durant la première phase de la puberté (43, 45, 50, 71, 86, 107, 115). Différents facteurs, liés notamment à la population d'étude et à la qualité du programme d'entraînement, peuvent expliquer l'hétérogénéité des résultats de la littérature. Rowland (1992) a avancé un certain nombre de raisons qui pourraient expliquer une telle diversité des résultats de la littérature. Parmi les plus importantes, il convient de noter la grande variabilité des régimes d'entraînement (durée, nature, fréquence hebdomadaire, intensité) auxquels sont soumis les sujets, l'absence de

population contrôle dans certains travaux, ce qui ne permet pas de prendre en compte, tout particulièrement dans les programmes de longue durée, l'effet de la croissance, le niveau d'activité physique naturellement élevé chez l'enfant, ce qui a pour effet de constituer des groupes expérimentaux et contrôles déjà très entraînés, enfin les populations d'étude incluant souvent des classes d'âges variées et où le niveau de maturation sexuelle n'est pas toujours établi au début et à la fin de l'étude.

Dans un article publié par Kemper et Van De Kop (1995) les auteurs analysèrent 27 études longitudinales sur les effets de l'entraînement sur VO₂ max. des enfants et adolescents. Les constats suivants ont été faits. L'augmentation moyenne de VO₂ max./PC dans les études à court terme (moins de 6 mois, $n = 18$) est de 7,6 % et dans les études à long terme (6 mois ou plus, $n = 9$) de - 1,8 %. Lorsque les critères d'entraînement de l'American College of Sports Medicine (1990) sont respectés les augmentations étaient similaires chez les enfants pré et péri pubères avec des valeurs de 10,7 % et 11,0 %, respectivement. Ces valeurs sont similaires à celles de 5 à 25 % rapportées pour les adultes. Chez les enfants pré pubères, les neuf études montrent des effets d'entraînement nettement plus importants que celles qui ne les respectent pas (+8,4% vs +0,9%, $p < 0,05$). L'entraînement intensif aérobie dès la période pré ou péri pubertaire n'accroît pas le VO₂ max/PC à des niveaux comparables à ceux des athlètes de haut niveau. De nouvelles études semblent souhaitables pour préciser les normes d'entraînement aérobie chez les enfants.

4. Les Stades de la Puberté :

4.1. Le concept de stade pubertaire :

La notion de stade pubertaire date du début du XXI^{ème} siècle où Godin en 1913 introduit les premiers caractères descriptifs ; il élabore 5 stades chez le garçon (de Po impubère à P4 pubère). Un peu plus tard en 1956,

Delaunay et Deschamps ont étudié les modifications des caractères somatiques de référence : la taille assis en fonction de l'âge physiologique. Leurs travaux montrent que l'on ne peut regrouper des adolescents de développement très dissemblable, bien qu'ils aient le même âge. Le développement biologique n'évolue pas nécessairement de concert avec l'âge chronologique (102). La vitesse du développement biologique est généralement associée à « âge biologique » ou encore, au « taux de maturation » (85).

L'état de maturation est actuellement estimé (dans pratiquement toutes les études) par comparaison avec les standards de la classification pubertaire de Tanner (1962). Ces indices distinguent cinq niveaux de maturation en caractérisant les modifications sexuelles subies par l'organisme en voie de croissance. Cette classification rend compte de l'évolution des paramètres en fonction du développement pubertaire.

L'analyse de maturation par comparaison aux standards de Tanner est une méthode simple et moins coûteuse que la mesure de la concentration salivaire de testostérone (69, 156) ; si elle se justifie lors de l'étude d'un grand nombre de sujets, elle nécessite cependant que les observations soient faites par la même personne (60).

Plusieurs études (34, 43, 128) ont montré que la classification pubertaire est plus favorable que la traditionnelle classification par âge dans l'étude des aptitudes physiologiques, morphologiques et physiques des enfants en période pubertaire.

4.2. La classification des stades de la puberté :

La puberté est la période de transition entre l'enfance et l'état adulte. Elle correspond à la période de la vie durant laquelle s'effectue la maturation sexuelle, c'est-à-dire la croissance des gonades (ovaires ou testicules) sous l'effet de la stimulation hypothalamo-hypophysaire, le développement des caractères sexuels secondaires et l'acquisition des fonctions de reproduction.

Dans les enquêtes européennes et nord-américaines, l'âge moyen auquel apparaissent les premiers caractères sexuels secondaires est de 11.5 ans chez la fille et 12.5 ans chez le garçon. Selon Dekkar (1996) la puberté est plus tardive en Algérie, d'une année et demi au moins.

Ainsi comme le souligne bien Vandervael (1980), si tous les enfants passent par les mêmes phases évolutives au cours de leur croissance, il y a cependant entre eux de grandes différences en ce qui concerne l'âge auquel ces différentes phases sont atteintes. Il est d'un intérêt évident de pouvoir faire le diagnostic de l'étape du développement dans laquelle les enfants sont arrivés, c'est-à-dire de définir leur « âge physiologique » par rapport à leur « âge chronologique ». Dans ce but les auteurs utilisent quatre types de critères que sont le degré d'ossification du squelette, l'âge d'éruption des dents, les caractéristiques biométriques et le développement des caractères sexuels secondaires.

4.2.1. le degré d'ossification du squelette :

La radiographie de la main et du poignet gauche de face permet, par comparaison aux photographies de l'atlas de la main de Greulich et Pyle, de déterminer l'âge osseux. Selon Brauner R. et coll. (1986) l'apparition du céphalocéphal du pouce est un repère commode car elle est, en général, contemporaine du démarrage pubertaire (11 ans chez la fille et 13 ans chez le garçon). Cependant, chez l'enfant normal, l'âge osseux n'est pas un meilleur indicateur de maturation que l'âge chronologique, comme le montre le travail de Largo (1979). Celui-ci indique que dans les deux sexes l'âge chronologique et l'âge osseux, correspondant respectivement à la vitesse de croissance minimum et maximum, sont superposables. L'âge osseux reste un indicateur utile en cas de pathologie ou de retard pubertaire.

4.2.2. l'âge d'éruption des dents :

Selon Vandervael (1980) l'âge d'apparition des dents, bien que moins significatif que l'âge squelettique, peut servir à apprécier l'avance ou le retard de

développement. Cette classification se base sur un tableau qui indique l'âge auquel les différentes dents font normalement leur éruption, c'est-à-dire l'âge auquel leur couronne commence à apparaître à travers la gencive.

3.2.3. les caractéristiques biométriques :

Une partie importante des recherches sur la croissance s'était basée longtemps sur les mesures anthropométriques. Actuellement différentes technologies (radiographies, résonance magnétique, scanner) permettent de prendre des mesures très précises notamment pour apprécier les dimensions transversales des os, le développement des muscles et l'épaisseur du tissu adipeux, l'évolution des centres d'ossification ainsi que pour observer le développement et l'éruption des dents. Toutefois il est toujours utile de prendre quelques mesures biométriques dont les plus importantes sont celles de la taille et du poids qui peuvent être comparées aux valeurs moyennes des enfants de même âge. Néanmoins un enfant peut être plus grand que la moyenne non seulement parce qu'il a fait sa poussée de croissance plus tôt que la plupart des autres enfants de son âge, mais aussi, parce qu'il appartient à une famille dans laquelle la taille est héréditairement supérieure à la moyenne.

4.2.4. le développement des caractères sexuels secondaires :

Dans les enquêtes européennes et nord-américaines , l'âge moyen auquel apparaissent les premiers caractères sexuels secondaires est de 11,5 ans chez la fille et 12,5 ans chez le garçon (32). La puberté est plus tardive en Algérie, d'une année et demi au moins (55).

Les variations de l'âge de démarrage pubertaire d'un enfant à l'autre sont notables mais la séquence d'apparition des caractères sexuels secondaires est en règle générale respectée. La puberté précoce est définie par le développement des caractères sexuels avant l'âge de 8 ans chez la fille et de 10 ans chez le garçon. Le retard pubertaire est défini par l'absence de signe de puberté à l'âge de 13,5 ans chez la fille et de 14 ans chez le garçon. Le

développement des caractères sexuels secondaires est coté de 1 à 5, le stade 1 correspondant à l'aspect prépubère et le stade 5 au développement complet adulte (31, 39, 145).

Chez la fille, le premier signe est, dans la majorité des cas, l'apparition d'une pilosité pubienne accompagnée ou suivie de l'apparition d'un petit noyau mammaire souvent sensible. La pilosité axillaire apparaît quelques mois après. L'intervalle moyen entre le début du développement des seins et l'apparition des premières règles est de 2,2 ans. Les métrorragies ne deviennent cycliques qu'après un à deux ans et les premiers cycles sont souvent anovulatoires.

Chez le garçon, l'augmentation du volume des testicules sous l'effet de la stimulation par l'hypophyse est le signe annonciateur de la puberté. La virilisation du garçon résulte de la maturation des glandes surrénales et de la sécrétion de testostérone par les testicules. Ceci explique le délai de quelques mois entre, d'une part, le développement net de la verge, de la pilosité sexuelle et la survenue du pic de croissance.

5. L'évaluation de l'aptitude aérobie :

Les méthodologies de détermination de VO₂ max. et du lactate sanguin chez les enfants non-entraînés et les adolescents en réponse à des exercices sont moins sûres que celles utilisées pour les adultes. Elles sont limitées aussi par des considérations éthiques.

L'analyse appropriée et l'interprétation des données collectées lors d'expériences avec des sujets jeunes sont problématiques et doivent être considérées en relation avec la croissance et la maturation des enfants (13).

La mesure de VO₂ max. requiert un travail proche de l'épuisement. Plusieurs chercheurs ont hésités à utiliser ce type de test avec les enfants et ont par conséquent estimés VO₂ max. à partir des données de l'effort submaximal. La procédure la plus communément utilisée est la mesure des pulsations cardiaques submaximales et la déduction de la consommation d'oxygène

correspondante pour prédire VO₂ max. à partir du nomogramme d'Astrand (1986). Cependant le nomogramme résulte de données prises sur une population adulte et des hypothèses incorrectes peuvent être déduites quand on l'applique aux enfants. Woynarowska's (1980) a rapporté dans une étude que le nomogramme d'Astrand sous-estimait la VO₂ max. déterminée directement de 26 % chez les garçons et de 23 % chez les filles.

5.1. Les méthodes d'évaluation directes :

Il est tout d'abord nécessaire que la consommation d'oxygène mesurée soit maximale. Le meilleur critère d'atteinte de la consommation maximale d'oxygène est l'observation d'un plateau de consommation (18, 135) lorsque la puissance d'exercice est augmentée.

Cependant, un plateau de consommation d'oxygène n'est souvent pas observé en particulier chez l'enfant (124). La valeur la plus élevée de consommation d'oxygène mesurée devrait alors être dénommée pic de consommation au lieu de consommation maximale. Toutefois, dans de nombreux cas, le pic de consommation est considéré comme proche de la consommation maximale quand d'autres critères sont respectés : fréquence cardiaque maximale réelle ou théorique, quotient respiratoire supérieur ou égal à 1,1, lactatémie supérieure à 8 mmol.L⁻¹ (89). Chez l'enfant les critères d'atteinte d'une consommation d'oxygène proche de VO₂ max. sont moins exigeants : quotient respiratoire égal ou supérieur à 1 et lactatémie supérieure à 6 mmol.L⁻¹ (136).

Epreuves triangulaires et rectangulaires :

Les protocoles de mesure de VO₂ max peuvent être subdivisés en protocoles triangulaires et rectangulaires. Dans les protocoles triangulaires, la puissance d'exercice croit par paliers de 1 à 4 min sans repos entre les différents paliers jusqu'à l'atteinte d'un plateau de VO₂ ou jusqu'à l'épuisement du sujet. VO₂ est mesurée en continu ou à la dernière minute des paliers. Dans les protocoles rectangulaires, le sujet réalise une série d'exercices de 5 à 6 min. Des

intervalles de récupération de 3 à 10 min séparent généralement les différents exercices mais, dans le cadre d'études expérimentales, cet intervalle peut dépasser la journée. La puissance des paliers croît de 20 à 50 W sur ergocycle ; sur tapis roulant soit la vitesse est augmentée de 1 ou 3 %. Si le plateau de consommation d'oxygène semble plus net dans les protocoles rectangulaires, les différences de VO₂ max mesurées avec les protocoles rectangulaires et triangulaires sont peu importantes (68, 96, 104, 146). Aussi, les épreuves triangulaires sont généralement utilisées pour des raisons de commodités.

5.2. Les méthodes d'évaluation indirecte :

Les épreuves destinées à l'estimation indirecte de VO₂ max peuvent être subdivisées en épreuves maximales et épreuves sous-maximales. Toutes ces épreuves possèdent à des degrés divers les mêmes sources d'imprécision :

- ▶ l'incertitude sur le coût énergétique individuel de l'exercice est la principale source d'erreur ;
- ▶ la participation plus ou moins importante du métabolisme anaérobie est une deuxième source d'imprécision de la prédiction de VO₂ max dans les tests où le sujet réalise un exercice maximal ;
- ▶ l'incertitude sur la fréquence cardiaque maximale dans le cas des tests sous-maximaux ;
- ▶ l'incertitude sur le caractère maximal de l'exercice chez des sujets peu motivés dans le cas des épreuves indirectes maximales.

5.2.1. Epreuves indirectes sous-maximales :

Les épreuves indirectes sont fondées sur la mesure d'une fréquence cardiaque à l'état stable d'un exercice sous-maximal. Ces exercices sous-maximaux consistent généralement soit en un exercice de pédalage sur ergocycle, soit en la montée d'une marche (step-test). La durée de ces exercices est suffisante (5 min et plus) pour qu'un état relativement stable se soit installé. La puissance

d'exercice doit être suffisamment sous-maximale pour que le métabolisme aérobie assure la quasi-totalité de la demande énergétique.

5.2.2. Epreuves indirectes sur ergocycle :

► **Epreuve d'Astrand-Ryhming (1954)** : cette méthode d'estimation indirecte de VO₂ max est la plus connue de toutes. Elle est fondée sur les 2 hypothèses suivantes :

- 1) il existe une relation linéaire entre la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène pour les exercices sous-maximaux. Statistiquement, à un pourcentage donné de la consommation maximale d'oxygène correspond, à l'état stable, une fréquence cardiaque. Ainsi, chez l'homme adulte, 128 battements par minute à l'état stable correspondent à 50 % de VO₂ max et 154 battements par minute à 70 % de VO₂ max.
- 2) pour une même puissance d'exercice, le rendement mécanique est supposé peu différent d'un sujet à l'autre (23 %) et, par conséquent, il est possible d'exprimer la puissance d'exercice en équivalent oxygène (Vandewalle & Friemel, 1989). Connaissant la puissance d'exercice, la consommation d'oxygène pendant l'épreuve peut être supposée. Par exemple, si le sujet effectue un exercice de 150 W, la valeur la plus probable de sa consommation d'oxygène à l'état stable de cet exercice est de 2,1 L.min⁻¹.

L'épreuve consiste donc à faire pédaler le sujet pendant 6 min à une puissance constante (pour des sujets moyens, 150 W pour les hommes et 100 W pour les femmes). La fréquence cardiaque est mesurée pendant la dernière minute quand l'état est considéré comme stable. La fréquence cardiaque doit être au minimum de 130 bpm. Un nomogramme (Astrand & Ryhming, 1954 ; Astrand & Rodahl, 1973) dispense l'utilisateur des calculs de dépense énergétique et de pourcentage de VO₂ max et donne rapidement la VO₂ max prédite.

L'incertitude sur le coût énergétique est une cause d'erreur importante. La relation entre fréquence cardiaque et pourcentage de VO₂ max est médiocre. De plus, la relation entre fréquence cardiaque et pourcentage de VO₂ max est différente chez l'enfant et chez l'adulte (29, 153).

► **Epreuve de Fox :**

Fox (1973) a proposé une méthode simple de prédiction de la VO₂ max fondée sur une équation linéaire entre la VO₂ max directe et la fréquence cardiaque mesurée à la 5^e min de pédalage à la puissance unique de 150 W. L'équation est la suivante :

$$\text{VO}_2 \text{ max prédite} = 6,3 - 0,0193.f_c$$

Cette méthode donne des valeurs prédites inférieures à celles du nomogramme d'Astrand-Ryhming pour les fréquences cardiaques inférieures à 139 bpm à la 5^e min d'exercice et des VO₂ max prédites plus élevées pour les fréquences cardiaques supérieures à 139 bpm (150).

5.2.3. Step-test :

Lors de la montée d'une marche, le travail mécanique externe W (en joules) réalisé est donné par la formule :

$$W = h.m.g$$

ou m est la masse corporelle du sujet (kg), h la hauteur de la marche (m) et g l'accélération de la pesanteur (9,81 m.s⁻²). Si le sujet monte n fois la marche en 1 min, la puissance mécanique externe P (en watts) est donnée par la formule :

$$P = n.m.g./60$$

Les méthodes indirectes fondées sur la mesure de la fréquence cardiaque lors de la montée d'une marche (step-tests) partent des mêmes hypothèses que celles des tests sous-maximaux sur ergocycles décrits plus haut. Le nomogramme d'Astrand-Ryhming peut être utilisé lors d'un step-test. Le step-test d'Astrand consiste à monter une marche à la fréquence de 22,5 fois par min. La hauteur de la marche est de 40 cm pour les hommes et de 33 cm pour les

femmes. La précision de VO₂ max au moyen du step-test d'Astrand est médiocre (Camus F. et coll., 1974 ; Barrault, 1976).

D'autres auteurs comme Margaria R. et coll. (1965) ont proposé d'autres nomogrammes ou formules pour des step-tests fondés sur un principe légèrement différent : montée d'une marche de 40 cm à 2 fréquences imposées (15 et 25 montées par min). Les fréquences cardiaques correspondant aux 2 fréquences de montée sont reportées sur une abaque. La valeur prédite dépend de la fréquence cardiaque maximale. L'abaque propose une prédiction de VO₂ max pour 3 fréquences cardiaques maximales (200, 180, 160) théoriques ou réelles.

Pour les enfants, la hauteur de la marche est de 30 cm et les fréquences de montée sont de 15 et 27 par min. Ces mêmes auteurs ont proposé dans le même article une deuxième abaque adaptée à ce protocole particulier. D'après Margaria et coll. (1965), la précision de la prédiction par cette méthode est meilleur que celle obtenue avec le step-test d'Astrand.

Par ailleurs plusieurs études préconisent d'adapter la hauteur de la marche à la taille des sujets. Par exemple, Francis et Cuipepper (1988) proposent l'équation suivante :

$$\text{Hauteur} = 0,187 \cdot \text{Taille}$$

5.2.4. Epreuves indirectes maximales :

La plupart de ces épreuves sont réalisées sur le terrain et consistent généralement soit en tests de performance maximale en course à pied sur une distance imposée ou une durée donnée, soit en tests d'intensité progressive jusqu'à épuisement. L'incertitude sur la fréquence cardiaque maximale des épreuves indirectes sous-maximales est remplacée par l'incertitude sur le caractère maximal de l'épreuve. A la différence des épreuves sous-maximales, une motivation suffisante est indispensable dans ces épreuves maximales.

► **Le test de Cooper :**

L'épreuve la plus connue est le test de Cooper (1968) qui est étalonné pour prédire la valeur de la VO₂ max (mlO₂/min/kg) à partir de la distance (D en mètre) la plus longue parcourue en 12 minutes. La durée de 12 minutes est choisie parce qu'elle correspond au temps de maintien de la puissance maximale aérobie. Les résultats de cette épreuve sont positivement corrélés avec les résultats de VO₂ max obtenus par mesure directe (48, 72). Le résultat d'un test Cooper est un bon indice de la puissance aérobie mais l'équation proposée (VO₂ max = 0,022 D – 11,3) n'est pas applicable à toutes les populations et l'extrapolation à la VO₂ max est souvent imprécise (119, 150). En effet les résultats sont influencés par le rendement mécanique, la motivation et par la capacité anaérobie.

Tests d'intensité progressive :

Les tests progressifs de prédiction indirecte de VO₂ max ont été mis au point pour pallier les limites du test de Cooper. Ces tests progressifs sont réalisés soit en laboratoire sur bicyclette ergométrique soit sur le terrain en course à pied et en natation.

► **Tests progressifs sur ergocycle :**

Patton et coll. (1982) ont proposé le protocole suivant : le sujet pédale sur ergocycle Monark à 75 tours par min pendant 2 min à vide, puis contre une force de freinage qui est augmentée de 0,5 kg toutes les minutes, c'est-à-dire augmentée de 37,5 W par minute. La force de freinage est augmentée jusqu'à ce que le sujet soit incapable de pédaler au-dessus de 70 tours par minute pendant au moins 10 sec. Si une force de freinage ne peut être maintenue pendant la minute entière, la puissance correspondante au palier précédent est retenue comme puissance maximale aérobie. La puissance maximale aérobie (P en watts) déterminée par ce protocole a été corrélée avec des valeurs de VO₂ max (L.min⁻¹) sur tapis roulant et sur ergocycle.

Par la suite, Brue F. et coll. (1985) ont proposé une version de ce test adaptée à un autre type d'ergocycle.

► **Test progressif de course de l'université de Montréal (Léger & Boucher, 1986) :**

Ce test consiste à courir le plus longtemps possible autour d'une piste à vitesse imposée. La vitesse qui augmente toutes les 2 min est imposée par des signaux sonores émis à intervalles réguliers. A chaque signal, le sujet doit se trouver à proximité d'une des bornes disposées à intervalles réguliers à la corde de la piste. L'épreuve est terminée quand le sujet est incapable de suivre la vitesse imposée. La valeur prédite de VO₂ max (ml.kg⁻¹.min⁻¹) à partir de la vitesse de course du dernier palier V (km.h⁻¹) est donnée par l'équation suivante :

$$\text{VO}_2 \text{ max} = 14,49 + 2,143 V + 0,0324 V^2$$

Brue F. et coll. (1989) ont adapté le test en faisant précéder les coureurs d'un cycliste pour imposer la cadence. Lacour et coll. (1990) adoptent des paliers plus courts de 30 secondes.

► **Test progressif de course navette (Léger, 1981 ; Léger & Gadoury, 1989) :**

2 lignes parallèles sont tracées à 20 mètres l'une de l'autre. Le test consiste à effectuer le plus longtemps possible des allers-retours de 20 m à vitesse imposée. La vitesse est imposée au moyen de signaux sonores enregistrés sur bande magnétique et émis à intervalles réguliers. A chaque signal le sujet doit se trouver légèrement au-delà de l'une des lignes parallèles. La vitesse est augmentée toutes les 2 min. La valeur de la VO₂ max prédite (ml.kg⁻¹.min⁻¹) à partir de la vitesse de course (V en km.h⁻¹) est donnée par la formule :

$$\text{VO}_2 \text{ max} = 5,86 V - 19,46 \quad (r = 0,84)$$

Une épreuve de navette avec des paliers d'1 min a été proposée par la suite dans le but de rendre l'épreuve plus supportable par les sujets peu motivés (Léger et coll., 1984 ; Léger & Gadoury, 1989).

Les tests progressifs en course à pied présentent 3 intérêts essentiels par rapport au test de Cooper :

- ▶ le sujet n'a pas besoin de connaître sa vitesse de course optimale car la vitesse est imposée ;
- ▶ l'exercice est probablement psychologiquement mieux supporté car il n'est réellement difficile que dans les dernières minutes précédant l'épuisement et les sujets les plus faibles ne sont lâchés qu'à la fin de l'épreuve ;
- ▶ ces épreuves permettraient de connaître la vitesse maximale aérobie (Vitesse correspondant à la VO₂ max) qui est supposée correspondre à la vitesse du dernier palier de ces épreuves. La connaissance de cette vitesse permettrait de mieux orienter l'entraînement que la connaissance de la valeur réelle de la VO₂ max mesurée en laboratoire.

La validité de l'estimation de VO₂ max est maintenant bien établie (Léger et Lambert, 1982 ; Gadoury et Léger, 1986) même si une sous-estimation de l'ordre de 5 % est enregistrée dans la prédiction de VO₂ max calculée par rapport au VO₂ max réel (Poortmans et coll., 1986). Ces auteurs imputent la sous-estimation à la difficulté de motiver 20 à 30 sujets à poursuivre leur effort jusqu'au bout de leurs possibilités.

5.3. Importance de l'évaluation de l'aptitude aérobie dans les activités physiques :

L'aptitude aérobie est un indice significatif de la santé générale des enfants et des adolescents. Elle est considérée comme le meilleur index de santé en relation avec l'aptitude physique des enfants et des adolescents (90).

Durant la dernière décennie des liens se sont formés entre les médecins, les physiologistes et les cadres sportifs. Ce rapprochement motivé par l'intérêt de pratiquer des tests d'effort pour évaluer la condition physique de leurs athlètes a

permis de définir un profil des qualités et caractéristiques des sportifs de haut niveau dans un sport donné. Ces données permettent de mieux comprendre le sport en question et d'élaborer un entraînement adapté aux qualités physiques requises. La mesure de la puissance aérobie, reflet de la capacité de travail d'un individu, est le paramètre le mieux connu et le plus souvent analysé.

La mesure de la consommation maximale d'oxygène (VO₂ max) se fait depuis longtemps dans les sports où l'on pense plus ou moins justement qu'elle est un facteur limitant de la performance (78). C'est en particulier le cas des disciplines telles que la course à pied (demi-fond et fond), du ski de fond, du cyclisme et de l'aviron (19). Mais aujourd'hui, la quantité d'entraînement exigée pour atteindre et se maintenir au plus haut niveau impose aux disciplines à l'aspect technique plus ou moins prédominant (sports collectifs, tennis, golf, voile, tir, sports mécaniques...) une préparation physique générale de plus en plus importante et de plus en plus précoce. C'est pourquoi les entraîneurs de toutes les disciplines, soucieux de programmer la préparation de leurs athlètes, demandent que soit mesurée régulièrement la VO₂ max de leurs équipes. En effet, l'amélioration de la capacité aérobie va permettre aux sportifs de mieux accepter la quantité d'entraînement et de récupérer plus facilement (73).

Cependant chez les enfants et les adolescents les variations de VO₂ max absolue (Lmin⁻¹) dues à la croissance sont similaires à celles qui résultent d'un entraînement aérobie. L'évaluation d'un effet de l'entraînement durant la croissance est difficile, car le changement total observé est la somme des effets de l'entraînement, de la croissance ou du développement, et de l'interaction entre les deux. Avant de tirer des conclusions sur les effets de l'entraînement il est donc nécessaire d'apporter une correction pour les effets de la croissance ou du développement (86).

CHAPITRE 2 :

MATERIELS ET METHODES

1. Population :

Notre étude longitudinale a porté sur un groupe de deux cent jeunes collégiens sédentaires âgés de 11 à 15 ans (102 filles et 98 garçons). Tous ont consenti à suivre le protocole qui a été réalisé au sein de leur établissement scolaire.

2. Protocole expérimental:

Chaque sujet a été examiné avant d'être autorisé à suivre le protocole suivant qui a été utilisé à trois reprises sur une période de 30 mois par les mêmes examinateurs :

2.1. Evaluation du Stade Pubertaire :

L'état de maturation a été estimé par comparaison avec les standards de la classification pubertaire de Tanner (1962). Ces indices distinguent cinq niveaux de maturation en caractérisant les modifications sexuelles subies par l'organisme en voie de croissance.

2.2. Mesures Anthropométriques :

- ▶ mesure de la Taille (en cm) à l'aide d'une toise ;
- ▶ mesure du Poids du corps (en kg) à l'aide d'une balance (type HB-LO5) à précision 100 g ;
- ▶ mesure des principaux Périmètres du corps (Périmètres maximaux du Biceps, de la Cuisse, du Mollet) ;
- ▶ mesure des quatre Plis Cutanés (Bicipital, Tricipital, Sous-Scapulaire, Sus-iliaque) à l'aide d'une pince type Lange ;
- ▶ calcul du Poids Maigre (Durnin et Rahaman, 1967).

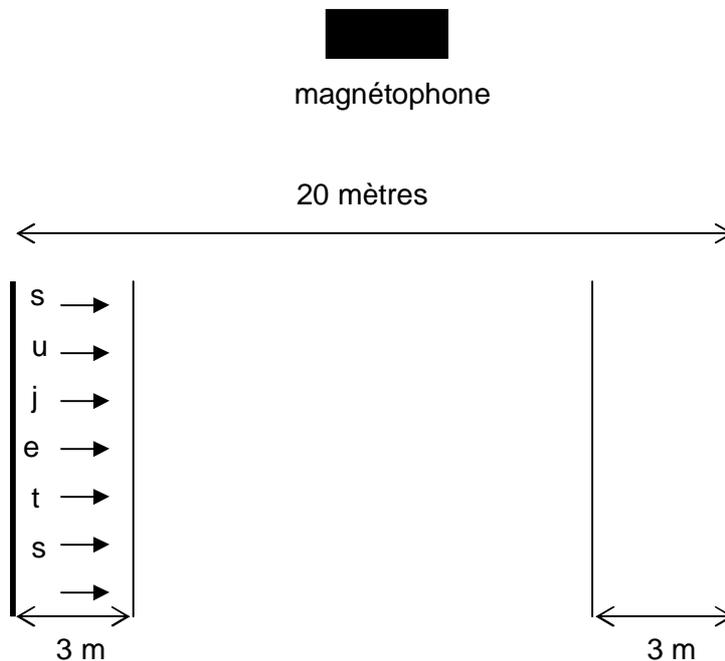
2.3. Evaluation de la Consommation Maximale d'Oxygène (VO2 max) :

La consommation maximale d'oxygène (VO2 max.) a été déterminée d'une manière indirecte par le test progressif de course navette de 20 m de Léger et Gadoury (1989).

L'épreuve consiste à courir sans arrêt en faisant des aller-retours sur un parcours de 20 m. L'épreuve est de type maximal et progressif : les sujets courent le plus longtemps possible jusqu'à ce qu'ils ne peuvent plus suivre la vitesse imposée. Cette vitesse débute à 8,5 km.h⁻¹ et augmente de 0,5 km.h⁻¹ par minute.

Une bande magnétique sert de support audiovisuel à l'épreuve navette de 20 m : à chaque signal sonore émis le sujet doit parvenir simultanément à l'une des extrémités du trajet de 20 m ; une avance ou un retard de 1 ou 2 m est toléré. L'épreuve est arrêtée lorsque le sujet accuse deux retards successifs de 3 mètres par rapport au signal sonore.

Schéma : course navette de 20 mètres.



2.4. Méthodes Statistiques :

Les différents résultats sont exprimés par leurs moyennes et leurs écarts types en fonction de la classification pubertaire. Nous avons procédé à des analyses de variance (ANOVA) pour mieux exprimer l'évolution des différents paramètres selon les stades de la maturation biologique. Cette analyse a été complétée par une étude de corrélation (corrélation de Pearson) pour voir le niveau de relation pouvant exister entre la consommation maximale d'oxygène et les principaux indices anthropométriques durant la puberté.

CHAPITRE 3 : **LES RESULTATS**

1. Les Indices Anthropométriques :

Les indices anthropométriques des Filles :

Les valeurs moyennes ainsi que les écarts types des différents indices anthropométriques mesurés chez les filles durant les quatre premiers stades de la puberté sont rassemblés dans le tableau 1 et représentés par les figures 2, 3, 4, 5 et 6 (p.39-40).

Tableau 1 : Valeurs moyennes (\pm écart type) des paramètres anthropométriques des Filles exprimées selon les stades de la puberté.

| Stades Pubert. | AGE (an) | TAILLE (cm) | POIDS (kg) | % M.G. | PDS. Maig. (kg) | Péri. Bic. (mm) | Péri. Cuis. (mm) | Péri.Mol. (mm) |
|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| S 1 (n=10) | 11.08 $\pm 0,6$ | 148.60 $\pm 7,24$ | 39.46 $\pm 11,59$ | 13.06 $\pm 4,94$ | 33.69 $\pm 9,8$ | 20.73 $\pm 4,09$ | 42.55 $\pm 6,47$ | 30.00 $\pm 4,46$ |
| S 2 (n=23) | 12.39 $\pm 0,7$ | 150.87 $\pm 6,45$ | 39.86 $\pm 11,99$ | 15.22 $\pm 4,89$ | 34.85 $\pm 6,87$ | 20.84 $\pm 4,04$ | 44.26 $\pm 5,78$ | 30.55 $\pm 3,28$ |
| S 3 (n=30) | 12.69 $\pm 0,6$ | 156.37 $\pm 7,36$ | 44.27 ± 7 | 12.35 $\pm 4,66$ | 38.16 $\pm 6,58$ | 21.10 $\pm 2,7$ | 43.95 $\pm 4,66$ | 26.18 $\pm 7,73$ |
| S 4 (n=27) | 13.36 $\pm 0,5$ | 158.52 $\pm 6,85$ | 50.04 $\pm 6,53$ | 15.01 $\pm 5,16$ | 43.23 $\pm 5,99$ | 22.94 $\pm 1,87$ | 46.17 $\pm 4,61$ | 33.57 $\pm 3,83$ |

Les résultats des filles montrent que la majorité des indices anthropométriques ont évolués (tableau 2). Mais cet accroissement n'est pas homogène durant les différentes étapes de la puberté. Ainsi on ne relève aucune augmentation significative pour tous les paramètres anthropométriques entre les stades pubertaires 1 et 2. Les accroissements significatifs apparaissent à partir du stade 2 ou l'on constate une évolution très significative du Poids et du Pourcentage de Matière Grasse ($p < 0,01$) ainsi que des Périmètres de la Cuisse et du Mollet ($p < 0,001$). Par contre on constate un **pic de croissance au stade 3** durant lequel le Poids, le Poids Maigre, le Périmètre de la Cuisse augmentent très significativement ($p < 0,001$), le Pourcentage de Matière Grasse évolue significativement ($p < 0,05$) et le Périmètre du Biceps s'accroît très significativement ($p < 0,01$).

D'autre part à ce stade 3 l'évolution de la Taille et du Périmètre du Mollet restent non-significative.

Tableau 2 : Analyse de variance à un facteur : évolution des indices anthropométriques des filles selon les stades de la puberté.

| Stades Pub. | S1-S2 | | S2-S3 | | S3-S4 | | S1-S3 | | S2-S4 | | S1-S4 | |
|---------------------|-------|----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| | F | P | F | P | F | P | F | P | F | P | F | P |
| Taille | 0,8 | NS | 8,07 | ** | 1,30 | NS | 6,46 | *** | 7,91 | *** | 8,14 | *** |
| Poids | 0,01 | NS | 2,82 | NS | 10,28 | *** | 1,68 | NS | 8,85 | *** | 6,55 | *** |
| % M.G. | 1,35 | NS | 4,73 | ** | 4,16 | * | 2,39 | NS | 2,97 | NS | 2,10 | NS |
| Poids Maig. | 0,15 | NS | 3,18 | NS | 9,16 | *** | 2,10 | NS | 10,74 | *** | 8,01 | *** |
| Péri. Biceps | 0,01 | NS | 0,08 | NS | 8,78 | ** | 0,06 | NS | 4,03 | * | 2,70 | * |
| Péri. Cuisse | 0,57 | NS | 14,40 | *** | 24,56 | *** | 8,72 | *** | 17,35 | *** | 12,21 | *** |
| Péri. Mollet | 0,16 | NS | 11,44 | *** | 2,91 | NS | 7,91 | *** | 7,26 | *** | 6,45 | *** |

*: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; ***: $P < 0,001$; NS: non-significatif.

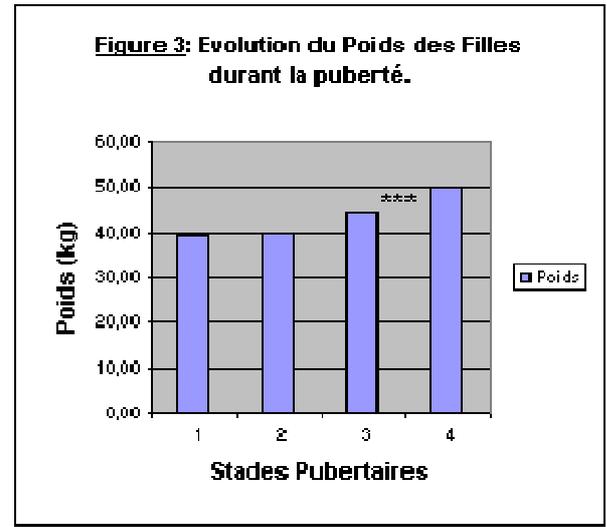
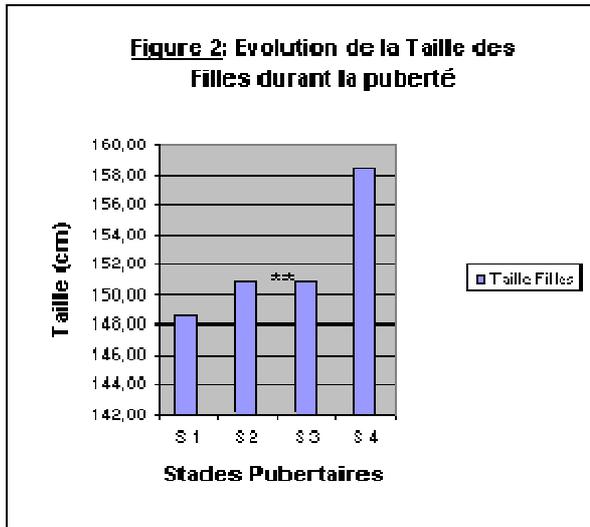


Figure 4: Evolution du Pourcentage de Masse Grasse (%MG) des Filles durant la puberté.

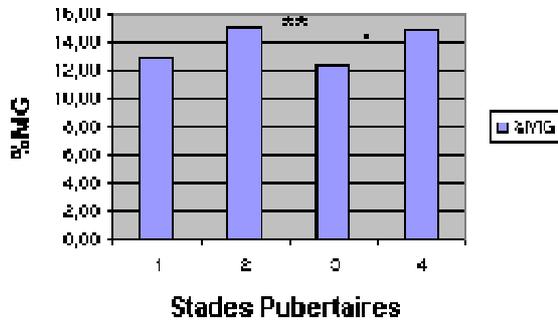


Figure 5: Evolution du Poids Maigre des Filles durant la puberté.

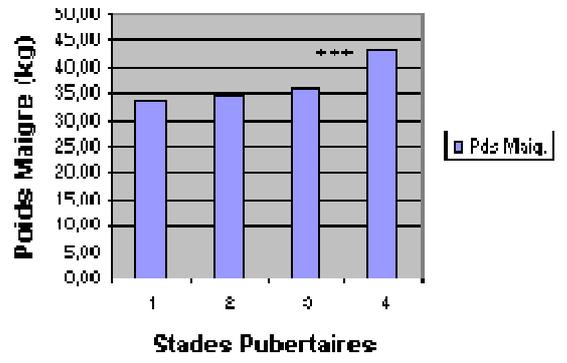
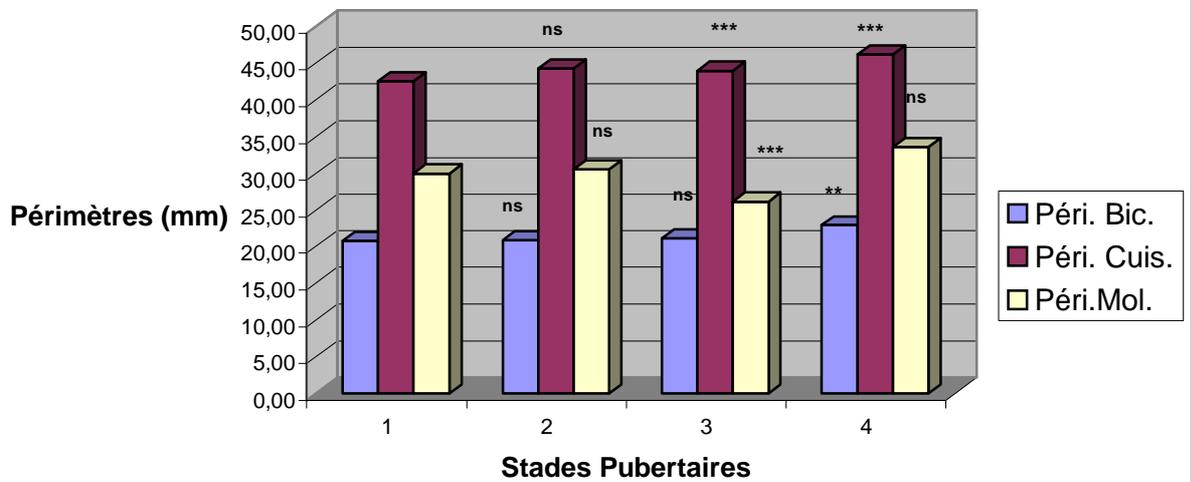


Figure 6 : Evolution des Périmètres du Biceps, de la Cuisse et du Mollet des Filles durant la puberté.



Les indices anthropométriques des Garçons :

Dans le tableau 3 sont réunies les données moyennes des mesures anthropométriques des garçons en fonction des stades de la puberté et représentées par les figures 8, 9, 10, 11 et 12 (p.42-43).

Tableau 3 : Valeurs moyennes (\pm écart type) des paramètres anthropométriques des Garçons selon les stades de la puberté.

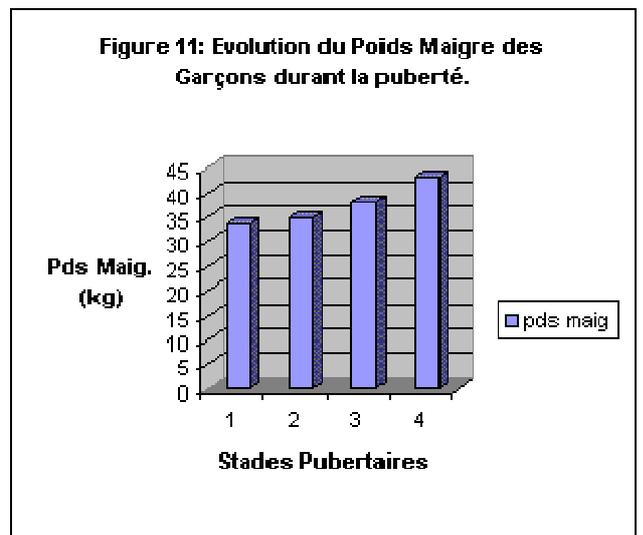
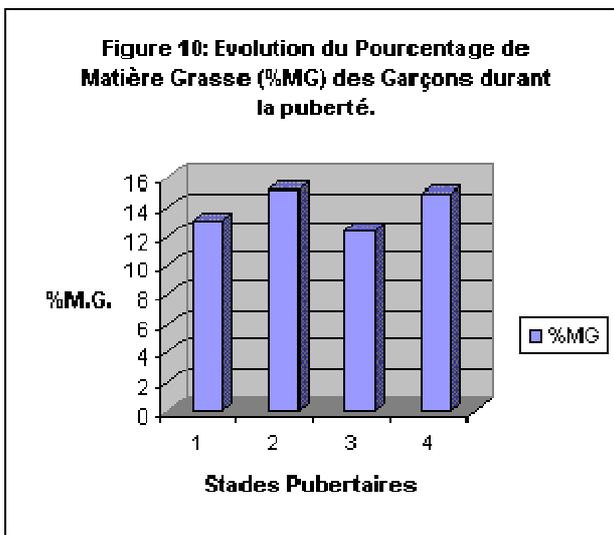
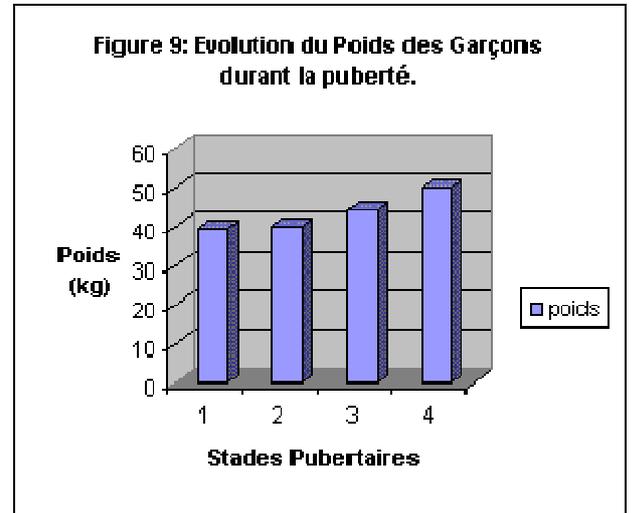
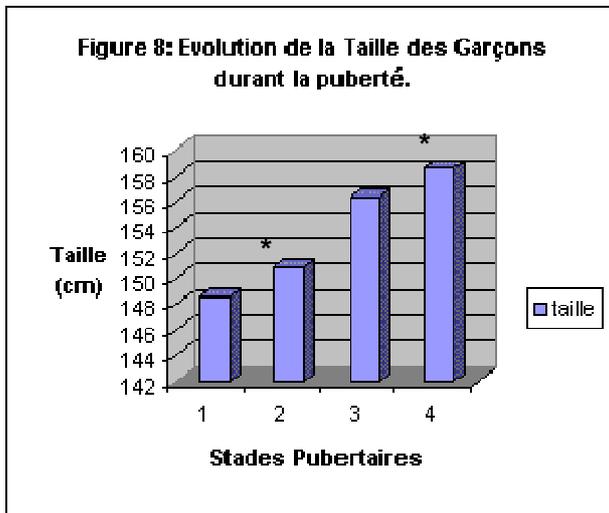
| Stades Pubert. | AGE (an) | TAILLE (cm) | POIDS (kg) | % M.G. | PDS. Maig. (kg) | Péri. Bic. (mm) | Péri. Cuis. (mm) | Péri.Mol. (mm) |
|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| S 1 (n=13) | 12.30 $\pm 0,6$ | 150.46 $\pm 7,13$ | 43.38 $\pm 8,26$ | 10.74 $\pm 4,84$ | 38.42 $\pm 5,63$ | 21.40 $\pm 3,11$ | 44.38 $\pm 5,56$ | 30.81 $\pm 3,09$ |
| S 2 (n=33) | 13.15 $\pm 0,7$ | 155.30 $\pm 7,32$ | 44.36 $\pm 8,13$ | 7.72 $\pm 4,63$ | 40.24 $\pm 6,35$ | 21.29 $\pm 2,45$ | 43.32 $\pm 4,79$ | 30.92 $\pm 2,44$ |
| S 3 (n=28) | 14.04 $\pm 0,8$ | 163.11 $\pm 6,91$ | 52.61 $\pm 9,19$ | 9.8718 $\pm 7,84$ | 46.49 $\pm 6,80$ | 22.946 $\pm 2,74$ | 44.57 $\pm 5,43$ | 33 $\pm 2,97$ |
| S 4 (n=15) | 14.99 $\pm 0,6$ | 168.13 $\pm 5,7$ | 56.31 $\pm 6,88$ | 8.72 $\pm 2,55$ | 50.93 $\pm 5,87$ | 23.40 $\pm 2,28$ | 45.20 $\pm 3,92$ | 33.21 $\pm 2,59$ |

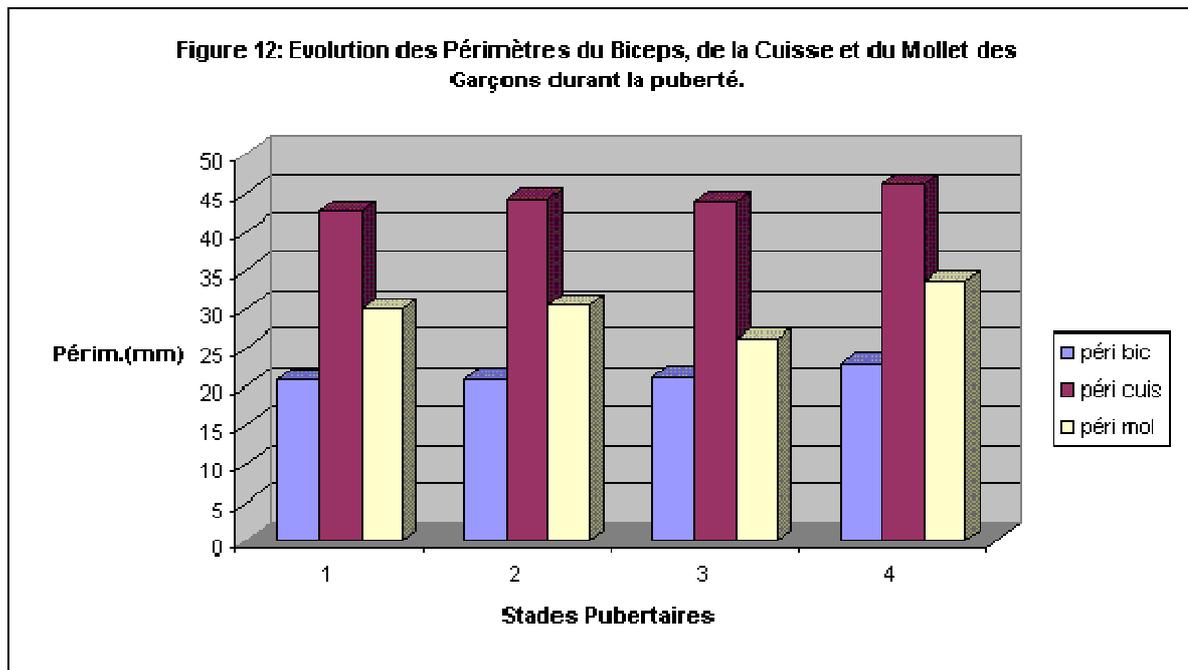
D'une manière générale on a constaté une évolution très significative de tous les indices morphologiques du premier au quatrième stade pubertaire (S1 à S4) sauf pour le Pourcentage de Matière Grasse (% M.G.) ainsi que pour le Périmètre de la Cuisse (tableau 4). Néanmoins la cinétique de chaque indice est différente d'un stade pubertaire à l'autre. Ainsi pour la majorité des paramètres mesurés aucune différence significative n'a été noté entre les stades 1 et 2 sauf pour la Taille ($p < 0,05$) et aucune différence significative entre les stades 3 et 4 sauf pour la Taille et le Poids ($p < 0,05$). Concernant les indices % M.G. et le Périmètre de la Cuisse aucune différence significative n'a été relevé à tous les stades. On remarque qu'un **pic de croissance** apparaît entre les stades 2 et 3. Ce pic de croissance s'exprime par une augmentation très significative ($p < 0,001$) durant cet intervalle de la Taille, du Poids, du Poids Maigre et du Périmètre du Mollet, et dans une moindre mesure ($p < 0,05$) du Périmètre du Biceps.

Tableau 4 : Analyse de variance à un facteur, évolution des indices morphologiques des garçons durant les stades de la puberté.

| Stades Pub. | S1-S2 | | S2-S3 | | S3-S4 | | S1-S3 | | S2-S4 | | S1-S4 | |
|--------------|-------|----|-------|-----|-------|----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| | F | P | F | P | F | P | F | P | F | P | F | P |
| Taille | 4,14 | * | 18,12 | *** | 5,75 | * | 16,53 | *** | 20,52 | *** | 21,63 | *** |
| Poids | 0,13 | NS | 13,84 | *** | 1,86 | * | 8,67 | *** | 13,23 | *** | 11,01 | *** |
| % M.G. | 3,87 | NS | 0,65 | NS | .5 | NS | 1,81 | NS | 0,47 | NS | 1,38 | NS |
| Poids Maig. | 0,82 | NS | 21,14 | *** | 1,99 | NS | 14,84 | *** | 18,38 | *** | 16,93 | *** |
| Péri. Biceps | 0,02 | NS | 6,24 | * | 0,30 | NS | 3,21 | * | 4,98 | ** | 3,55 | * |
| Péri. Cuisse | 0,42 | NS | 0,92 | NS | 0,16 | NS | 0,49 | NS | 0,93 | NS | 0,60 | NS |
| Péri. Mollet | 0,02 | NS | 8,98 | *** | 0,05 | NS | 5,06 | ** | 6,03 | *** | 4,71 | *** |

*: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; ***: $P < 0,001$; NS: non-significatif.





2. La Consommation Maximale d'Oxygène (VO2 max.) :

2.1. La VO2 max des Filles :

Sur le tableau 5 figurent les moyennes et écarts types de VO2max (ml.kg.mn.) et VO2max relative au poids maigre (ml.kgLBM.mn.)* des filles durant les quatre premiers stades pubertaires. Ces valeurs varient entre 45,56 ml.kg.mn au stade 1 et 43,50 ml.kg.mn au stade 4 pour VO2max relative au poids du corps et de 39.01 ml.kgLBM.mn au stade 1 à 37.39 ml.kgLBM.mn au stade 4.

*LBM = Lean Body Mass (Poids Maigre)

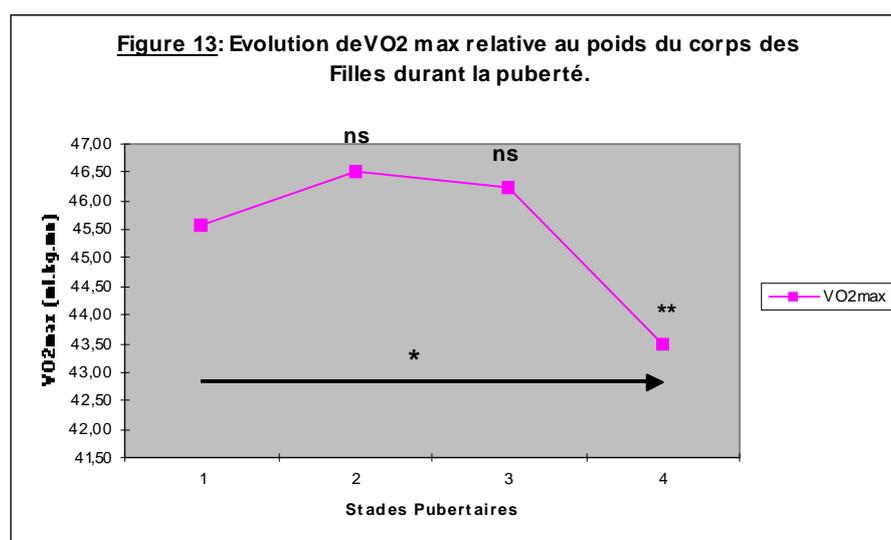
Tableau 5 : La VO2 max des Filles selon les stades de la puberté.

| Stades Pubert. | AGE | VO2max | VO2max |
|----------------------|-----------|-------------|----------------|
| | (an) | (ml.kg.mn.) | (ml.kgLBM.mn.) |
| S 1 (n=10) | 11.08 | 45.56 | 39.01 |
| | $\pm 0,6$ | $\pm 4,57$ | $\pm 4,30$ |
| S 2 (n=23) | 12.39 | 46.51 | 39.34 |
| | $\pm 0,7$ | $\pm 3,76$ | $\pm 4,07$ |
| S 3 (n=30) | 12.69 | 46.23 | 39.83 |
| | $\pm 0,6$ | $\pm 3,96$ | $\pm 4,15$ |
| S 4 (n=27) | 13.36 | 43.50 | 37.39 |
| | $\pm 0,5$ | $\pm 3,76$ | $\pm 4,42$ |

Après une augmentation qui n'est pas significative aux stades 2 et 3 (46,51 ml.kg.mn et 46,23 ml.kg.mn) la consommation maximale d'oxygène relative au poids du corps des filles diminue significativement ($p < 0.01$) à partir du stade 4 atteignant 43,50 ml.kg.mn. Cette diminution significative est relevée aussi entre les stades 2 et 4 ainsi qu'entre les stades 1 et 4.

Tableau 6 : Analyse de variance à un facteur, évolution de VO2max/Poids du Corps et VO2max/Poids Maigre des Filles durant la puberté.

| Stades Pubertaires | S1-S2 | | S2-S3 | | S3-S4 | | S1-S3 | | S2-S4 | | S1-S4 | |
|------------------------------|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|
| | F | P | F | P | F | P | F | P | F | P | F | P |
| VO2 max.(ml.kg.mn) | 0,39 | NS | 0,07 | NS | 7,09 | ** | 0,20 | NS | 4,98 | ** | 3,19 | * |
| VO2 max.(ml.kgLBM.mn) | 0,04 | NS | 0,18 | NS | 4,61 | * | 0,29 | NS | 2,52 | NS | 0,99 | NS |



L'analyse de variance (ANOVA) révèle une diminution très significative ($p < 0,01$) de VO2 max relative au poids du corps des filles entre les stades pubertaires 2 et 4 (tableau 6). Cette diminution est aussi très significative ($p < 0,01$) entre les stades de la puberté 3 et 4. Ces résultats montrent que la VO2 max/Poids du Corps des filles a tendance à diminuer au fur et à mesure que ces dernières deviennent plus matures ceci étant confirmé par une diminution significative ($p < 0,05$) entre le premier et le quatrième stade.

Quand à l'évolution de VO2 max relative au poids maigre elle est similaire à celle de VO2 max relative au poids du corps entre chaque stade de la puberté, néanmoins on note une plus grande stabilité de la première entre les stade 2 et 4 et entre les stades 1 et 4. Ainsi on constate qu'il n'y a pas d'évolution significative de VO2max/Poids Maigre des Filles durant les trois premiers stades de la puberté, par contre on relève une diminution significative ($p < 0,05$) entre les stades 3 et 4 (figure 14).

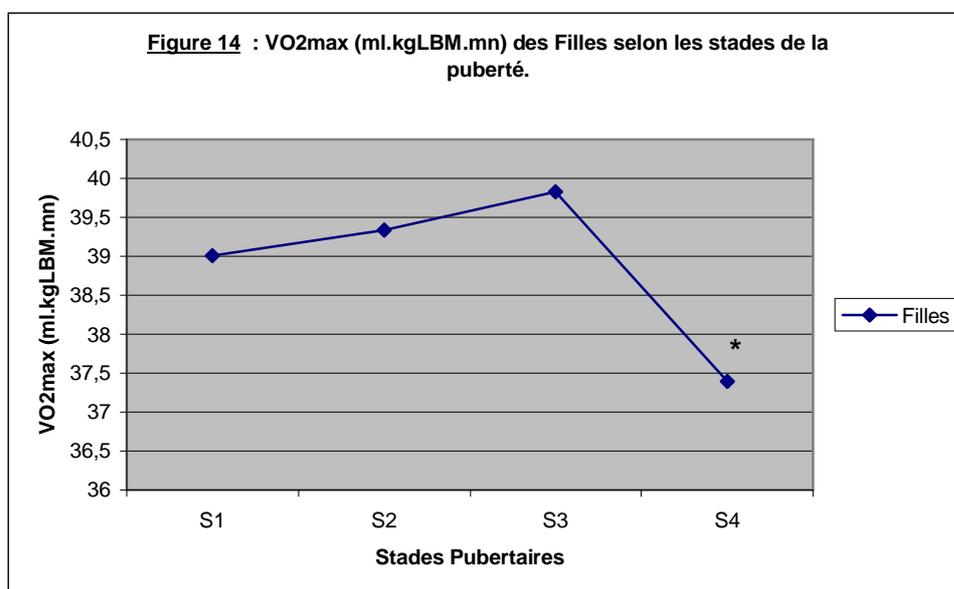
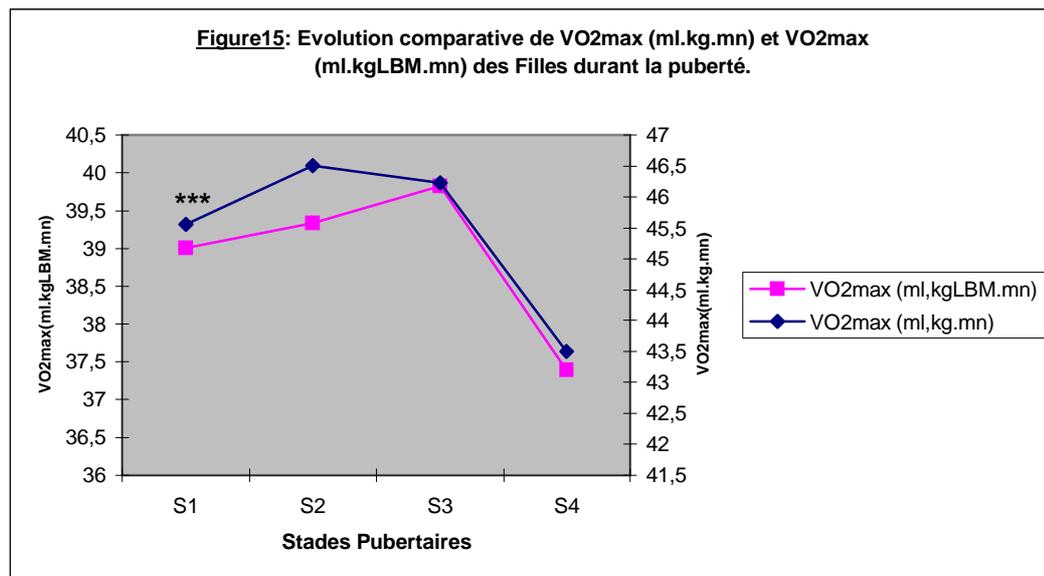


Tableau 7: Evolution comparative de VO2 max/Poids du Corps et VO2max/Poids Maigre des Filles durant la puberté.

| Stades Pubertaires | VO2max (ml.kg.mn) | VO2max (ml.kgLBM.mn) |
|--------------------|-------------------|----------------------|
| S1 | 45,56** | 39,01 |
| S2 | 46,51 ns | 39,34 |
| S3 | 46,23 ns | 39,83 |
| S4 | 43,50 ns | 37,39 |

ns: non significatif; *: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$



En comparant l'évolution de VO2max/Poids du Corps et VO2max/Poids Maigre des Filles on note une supériorité très significative ($p < 0,01$) de VO2max/Poids du Corps au stade 1. Par la suite, durant les stades pubertaires 2, 3 et 4 l'évolution des deux VO2max est similaire et aucune différence significative n'est relevée (figure15).

2.2. La VO2 max des Garçons :

Le tableau 8 montre les valeurs moyennes de VO2 max/Poids du Corps et VO2 max/Poids Maigre au cours des stades de la puberté. Ces valeurs varient de 47,59 ml.kg.mn au premier stade à 51,21 ml.kg.mn au quatrième stade pubertaire pour VO2max/Poids du Corps et de 42.53 ml.kgLBM.mn à 46.36 ml.kgLBM.mn pour VO2max/Poids Maigre.

Tableau 8 : La VO2 max des Garçons selon les stades pubertaires.

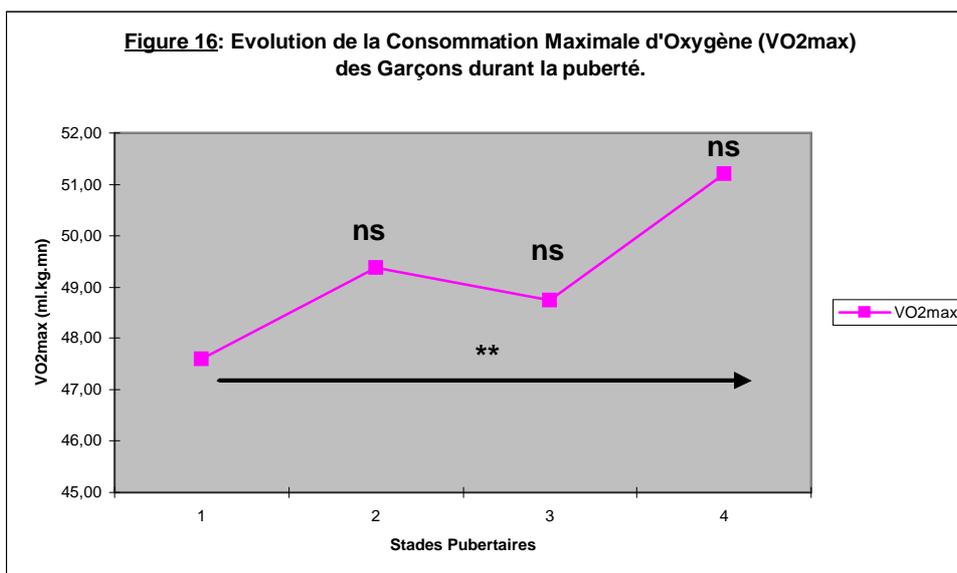
| Stades Pub. | AGE (an) | VO2max (ml.kg.mn.) | VO2max (ml.kgLBM.mn) |
|--------------------|----------|--------------------|----------------------|
| S 1 n=13 | 12.30 | 47.59 | 42.53 |
| | ± 0,6 | ± 4,26 | ± 4,93 |
| S 2 n=33 | 13.15 | 49.38 | 45.04 |
| | ± 0,7 | ± 4,09 | ± 4.23 |
| S 3 n=28 | 14.04 | 48.754 | 44.84 |
| | ± 0,8 | ± 5,10 | ± 6.02 |
| S 4 n=15 | 14.99 | 51.21 | 46.36 |
| | ± 0,6 | ± 2,87 | ± 2.83 |

Comme le montre la figure 16 chez les Garçons on ne relève aucune évolution significative de VO2max/Poids du Corps entre chacun des quatre stades pubertaires étudiés, néanmoins on note un accroissement significatif ($p < 0,01$) du stade 1 au stade 4, c'est-à-dire de 47.59 ml.kg.mn à 51.21 ml.kg.mn.

Tableau 9 : Analyse de variance à un facteur, évolution de la VO2 max des garçons selon les stades pubertaires.

| Stades Pub. | S1-S2 | | S2-S3 | | S3-S4 | | S1-S3 | | S2-S4 | | S1-S4 | |
|--------------------------|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|
| | F | P | F | P | F | P | F | P | F | P | F | P |
| VO2max.(ml.kg.mn) | 1,76 | NS | 0,28 | NS | 2,95 | NS | 0,74 | NS | 1,63 | NS | 4.21 | ** |
| VO2max.(ml.kgLBM) | 2.22 | NS | 0.02 | NS | 0.82 | NS | 1.46 | NS | 0.83 | NS | 6.57 | ** |

*: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; ***: $P < 0,001$; NS: non-significatif

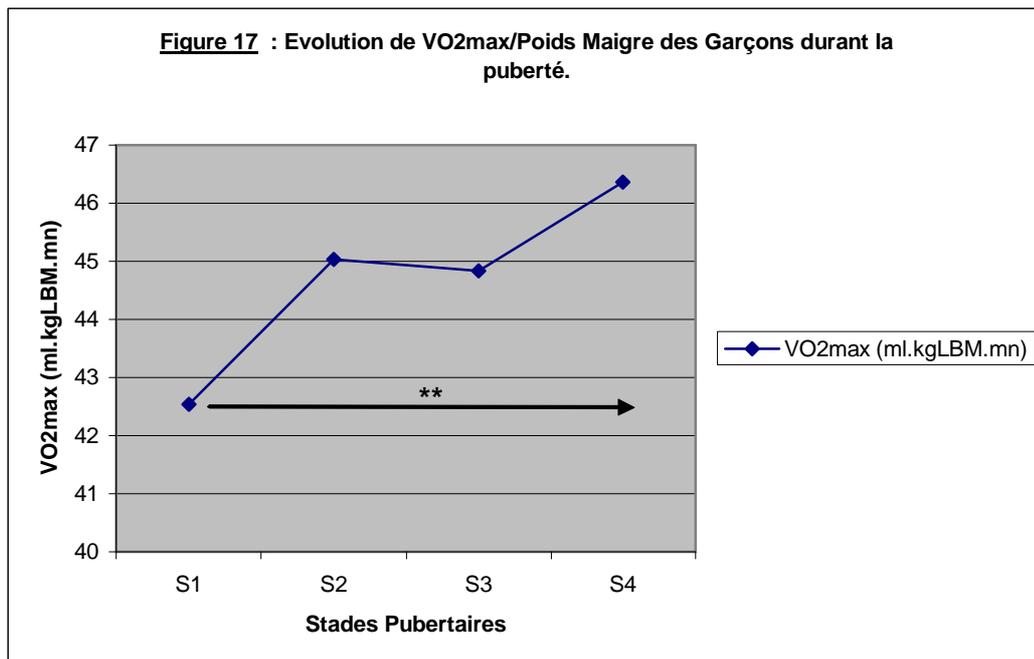


L'analyse de variance montre que l'évolution de VO₂max/Poids Maigre des Garçons est similaire à celle de VO₂max/Poids du Corps. On ne relève aucune différence significative à chacun des stades de la puberté mais aussi comme pour VO₂max/Poids du Corps il y a eu une augmentation significative ($p < 0.01$) entre le premier et le quatrième stade.

Tableau 10: Evolution comparative de VO₂ max/Poids du Corps et VO₂max/Poids Maigre des Garçons durant la puberté.

| Stades Pubertaires | VO ₂ max (ml.kg.mn) | VO ₂ max (ml.kgLBM.mn) |
|--------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| S1 | 47.59 ** | 42.53 |
| S2 | 49.38 *** | 45.04 |
| S3 | 48.75 *** | 44.84 |
| S4 | 51.21 ns | 46.36 |

*: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; ***: $P < 0,001$; NS: non-significatif



Comme pour les filles on note chez les Garçons que VO₂max/Poids du Corps est très significativement supérieur ($p < 0.01$) à VO₂max/Poids Maigre au premier stade pubertaire. Néanmoins et contrairement aux filles on relève chez

les Garçons que cette supériorité de VO₂max/Poids du Corps s'accroît significativement ($p < 0.001$) aux stades 2 et 3. Au stade 4 il n'y a plus de différence significative entre les deux VO₂max.

3. Comparaison des Filles et des Garçons :

3.1. Comparaison des indices anthropométriques : (tableau 11)

Comme le montre le tableau 11, au premier stade de la puberté il n'y a aucune différence significative entre les deux groupes (garçons et filles) pour tous les indices anthropométriques étudiés. Les différences significatives commencent à apparaître à partir du second stade pubertaire pour quelques indices et se généralisent pour tous les indices au troisième ainsi que pour les principaux paramètres au quatrième stade (taille, poids, %M.G. et poids maigre). Par ailleurs si l'on étudie chacun des indices à part l'on remarque certaines différences dans leur évolution respective.

Tableau 11 : Analyse de variance à un facteur, comparaison des indices anthropométriques des garçons et des filles selon les stades pubertaires.

| Stades Pub. | Stade 1 | | Stade 2 | | Stade 3 | | Stade 4 | |
|---------------------|---------|----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|
| | F | P | F | P | F | P | F | P |
| Taille | 0,38 | NS | 5,47 | * | 12,90 | *** | 21,12 | *** |
| Poids | 0,90 | NS | 2,81 | NS | 15,24 | *** | 8,56 | ** |
| % M.G. | 1,27 | NS | 34 | *** | 7,80 | ** | 19,44 | *** |
| Poids Maig. | 2,13 | NS | 9,15 | *** | 31,29 | *** | 16,16 | *** |
| Péri. Biceps | 0,20 | NS | 0,26 | NS | 6,69 | ** | 0,50 | NS |
| Péri. Cuisse | 0,53 | NS | 0,44 | NS | 18,44 | *** | 0,47 | NS |
| Péri. Mollet | 0,26 | NS | 0,24 | NS | 4,70 | * | 0,05 | NS |

*: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; ***: $P < 0,001$; NS: non-significatif.

La Taille :

Pour la Taille il n'y a pas de différence significative entre les deux groupes au premier stade de la puberté. Comme le montre la figure 18 les différences significatives de la Taille commencent au second stade de la puberté, la Taille des garçons devenant significativement supérieure ($p < 0,05$) à celle des filles. Cette supériorité devient très significativement supérieure aux stades 3 et 4 ($p < 0,001$).

Figure 18: Comparaison de la Taille des garçons et des filles durant la puberté.

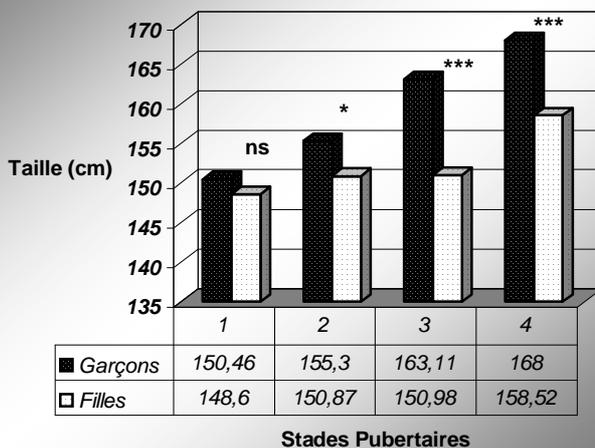
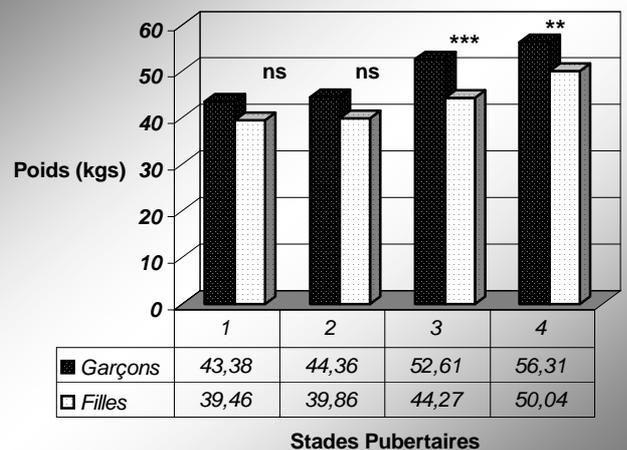


Figure 19: Evolution comparative du Poids des garçons et des filles selon les stades de la puberté.

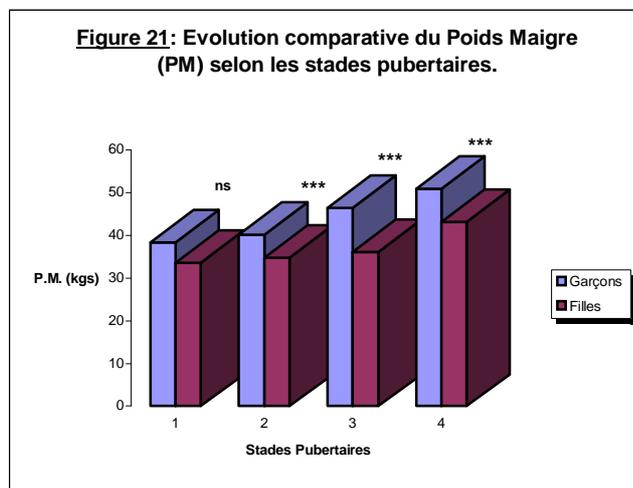
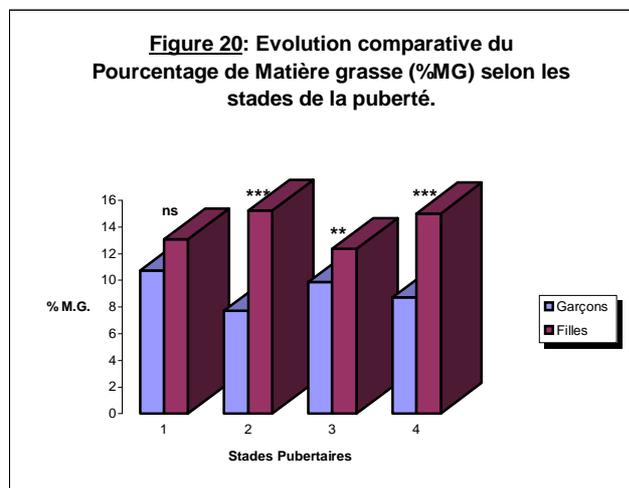


Le Poids :

Quand au Poids du corps les différences significatives entre filles et garçons n'apparaissent qu'à partir du stade pubertaire 3. Au troisième stade pubertaire on note chez les garçons un poids très significativement supérieur ($p < 0,001$) à celui des filles. Cette supériorité très significative continue au stade 4 bien qu'à un degré moindre ($p < 0,01$) comme le montre la figure 19.

Masse Grasse et Poids Maigre :

On remarque que l'évolution de la Masse Grasse et du Poids Maigre est similaire (figures 20 et 21). Pour ces deux indices il n'y a pas de différence significative entre filles et garçons au premier stade de la puberté.



Tandis que la Masse Grasse des filles devient très significativement supérieur aux stades 2, 3 et 4, dans le même temps c'est le Poids Maigre des garçons qui devient très significativement supérieur aux mêmes stades.

Les Périmètres : (figures 22, 23, 24 p.52))

Les Périmètres du corps ont aussi une évolution globalement semblable. Il n'y a pas de différences significatives entre les deux sexes pour les trois périmètres mesurés (biceps, cuisse et mollet) aux stades pubertaires 1, 2 et 4. Par contre on relève des différences très significatives pour les trois périmètres au stade 3. Ainsi on constate qu'au troisième stade de la puberté les périmètres du biceps et de la cuisse des garçons sont très significativement supérieurs à celui des filles avec respectivement $p < 0,01$ et $p < 0,001$. Quand au périmètre du Mollet il est significativement supérieur chez les filles ($p < 0,05$) comparé à celui des garçons.

Figure 22: Périmètre du Biceps des Garçons et des Filles durant la puberté.

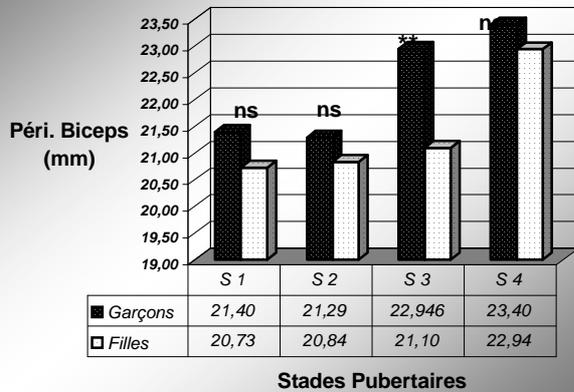


Figure 23: Périmètre de la Cuisse des Garçons et des Filles durant la puberté.

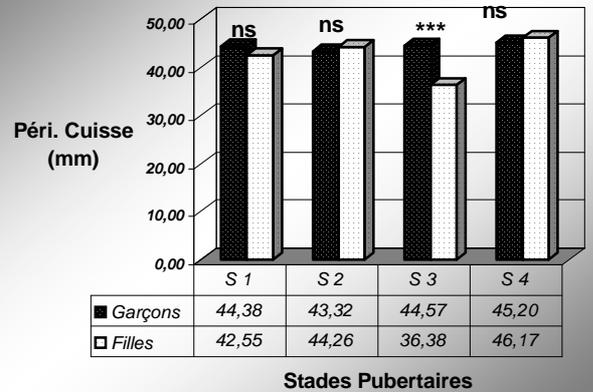
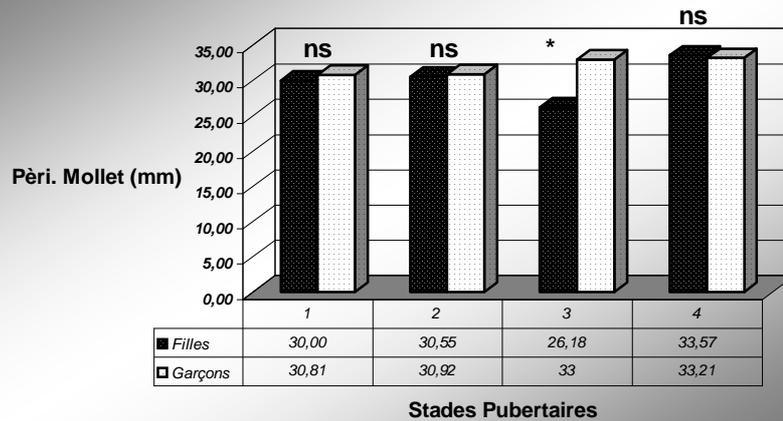


Figure 24: Evolution comparative du Périmètre du Mollet des Filles et des Garçons durant la puberté.



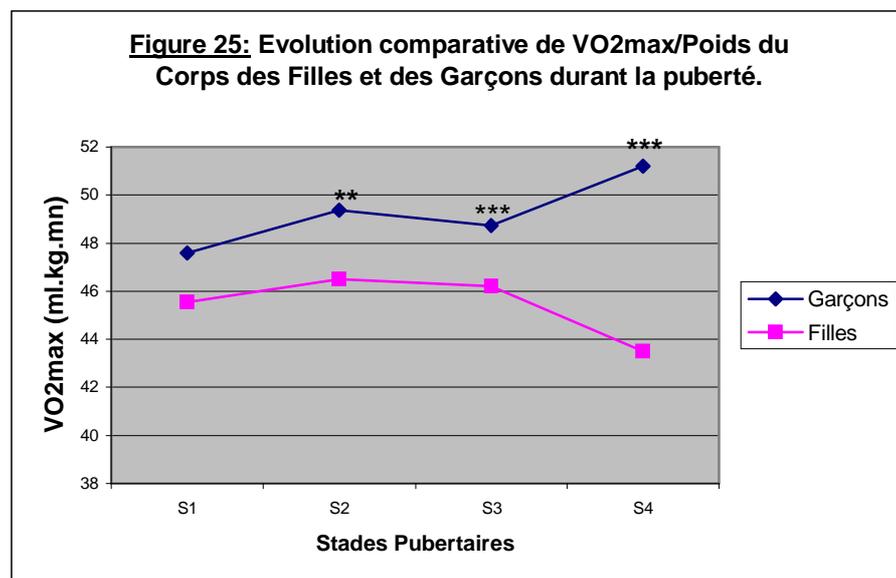
3.2. Comparaison des consommations maximales d'oxygènes :

Tableau 12 : Analyse de variance à un facteur, comparaison des VO2 max des filles et des garçons selon les stades de la puberté.

| Stades Pub. | Stade 1 | | Stade 2 | | Stade 3 | | Stade 4 | |
|------------------------------|---------|----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|
| | F | P | F | P | F | P | F | P |
| VO2 max.(ml.kg.mn) | 1,20 | NS | 7,21 | ** | 4,50 | *** | 47,44 | *** |
| VO2 max.(ml.kgLBM.mn) | 3.20 | NS | 18.55 | *** | 17.09 | *** | 49.92 | *** |

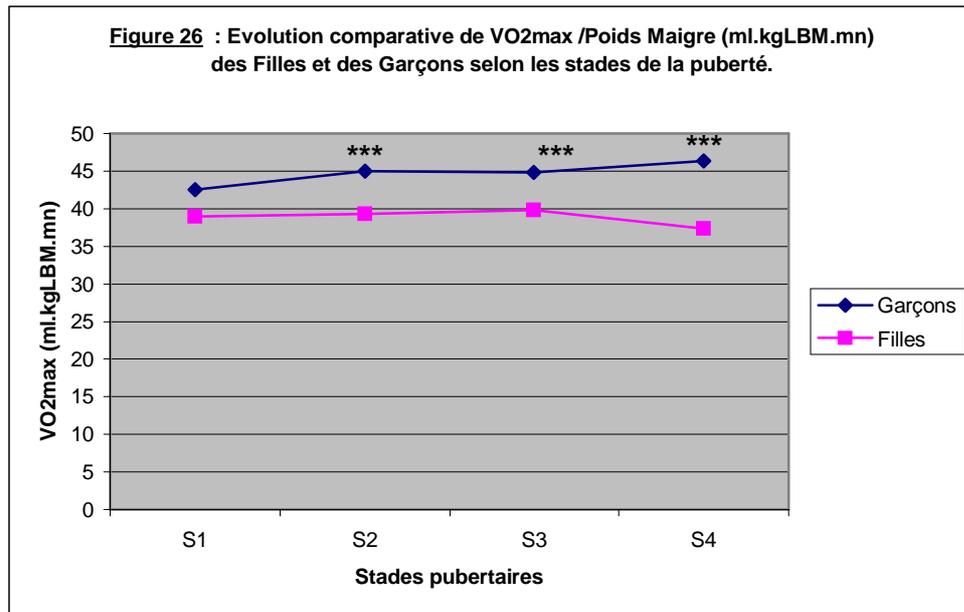
*: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; ***: $P < 0,001$; NS: non-significatif.

L'analyse de variance (ANOVA) indique qu'il n'y a pas de différence significative dans la consommation maximale d'oxygène (VO₂ max/Poids du Corps) entre les filles et les garçons au premier stade de la puberté (tableau 12). Globalement la VO₂ max/Poids du Corps des garçons est plus importante que celle des filles à tous les stades. Néanmoins les différences significatives ne commencent à se révéler qu'à partir du second stade pubertaire et s'accroissent aux stades suivants 3 et 4 (figure 25).



Quant à l'évolution de VO₂max/Poids Maigre des filles et des garçons elle semble similaire à VO₂max/Poids du Corps mais plus marquée à partir du stade 2 ($p < 0.001$).

Ainsi l'analyse de variance (tableau 12) montre qu'au deuxième stade de la puberté la VO₂ max/PC et VO₂max/Poids Maigre des garçons sont significativement supérieures ($p < 0,01$ et $p < 0.001$) à celles des filles. Cette différence significative continue à se maintenir aux stades 3 et 4 ($p < 0,001$). Parallèlement à cela la VO₂max/PC des filles a tendance à diminuer à partir du stade 3, passant de 46.51 ml.kg.mn au stade 2 à 46.23 ml.kg.mn au stade 3 puis 43.50 ml.kg.mn au quatrième stade.



4. Relation VO2 max / Indices anthropométriques :

Globalement l'analyse corrélative révèle une nette différence entre Filles et Garçons durant la puberté dans l'évolution corrélative de VO2max/Poids du Corps avec les paramètres anthropométriques que sont la taille, le poids, le pourcentage de masse grasse et le poids maigre.

4.1. Evolution corrélative de la VO2max/Poids du Corps des Filles avec les paramètres biométriques durant la puberté (coefficient de Pearson $p < 0.05$) :

STADE PUBERTAIRE 1 :

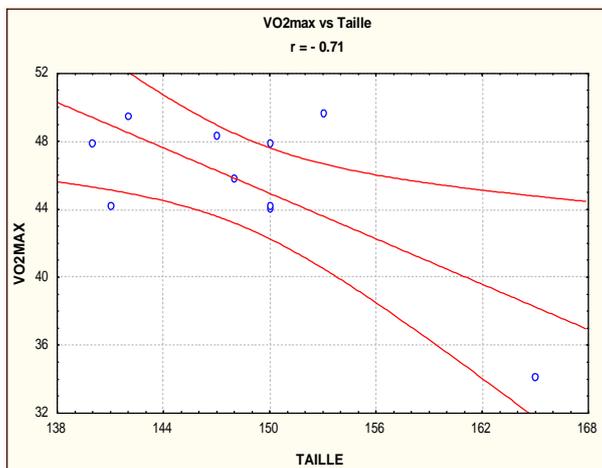
La VO2max des Filles au premier stade pubertaire se révèle corrélée significativement avec la Taille, le Poids et le Poids Maigre. Par contre on ne constate pas de corrélation significative avec le Pourcentage de Masse Grasse.

Tableau 13 :

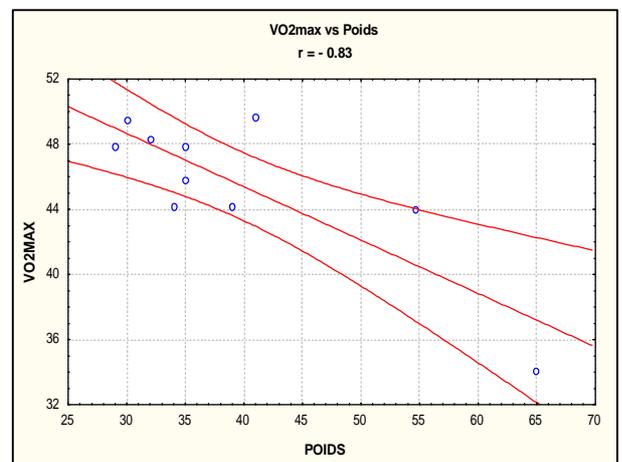
| Indices | TAILLE | POIDS | %MG | Pds Maig. |
|---------|---------|----------|------|-----------|
| Stade 1 | -0.71 * | - 0.83 * | 0.09 | -0.89 * |

*= *significatif*

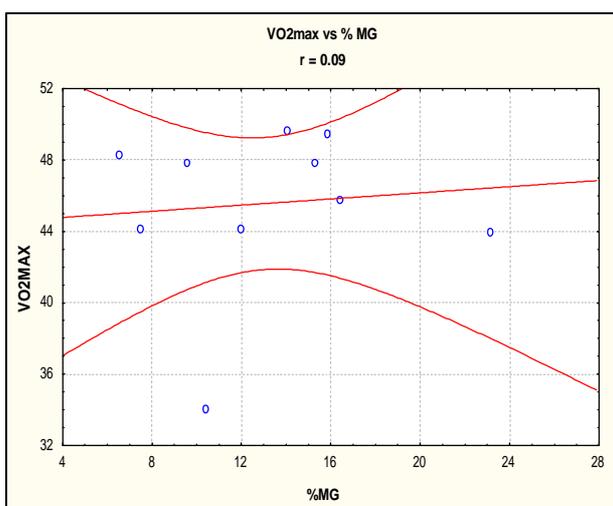
a 1



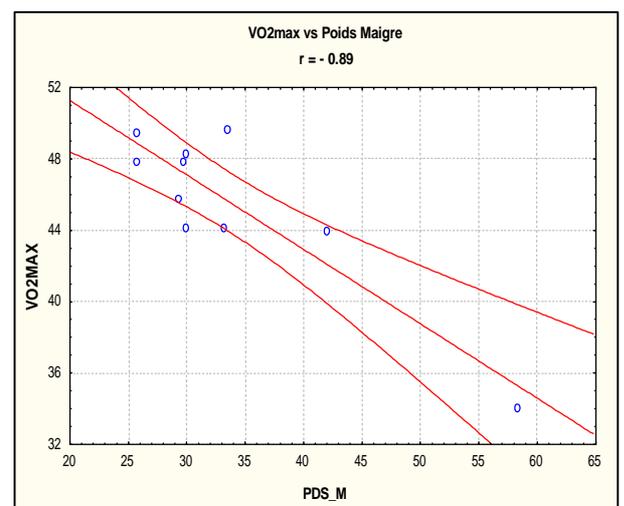
b 1



c 1



d 1



STADE PUBERTAIRE 2:

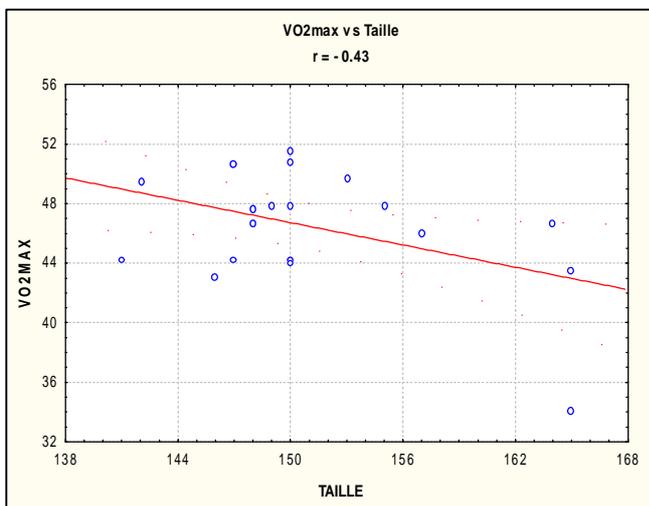
Comme au premier stade de la puberté la VO2max des Filles s'avère corrélée significativement avec les mêmes indices anthropométriques que sont la Taille, le Poids et le Poids maigre. Là aussi on note l'absence de corrélation significative de VO2max avec le Pourcentage de Matière Grasse.

Tableau 14 :

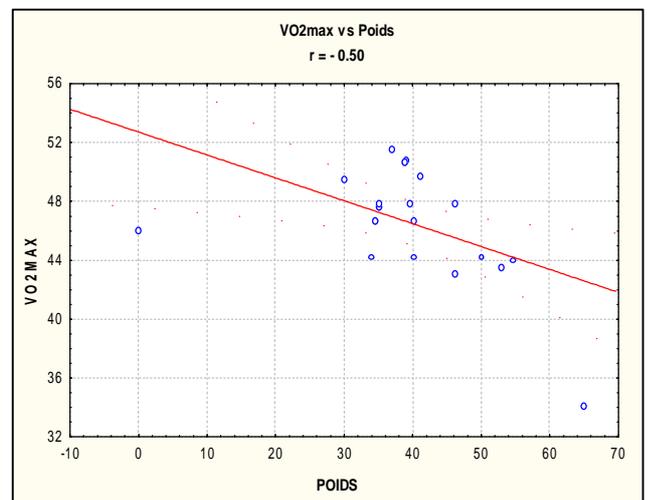
| Indices | TAILLE | POIDS | %MG | Pds Maig. |
|---------|----------|----------|------|-----------|
| Stade 2 | - 0.43 * | - 0.50 * | 0.02 | - 0.76 * |

*= significatif

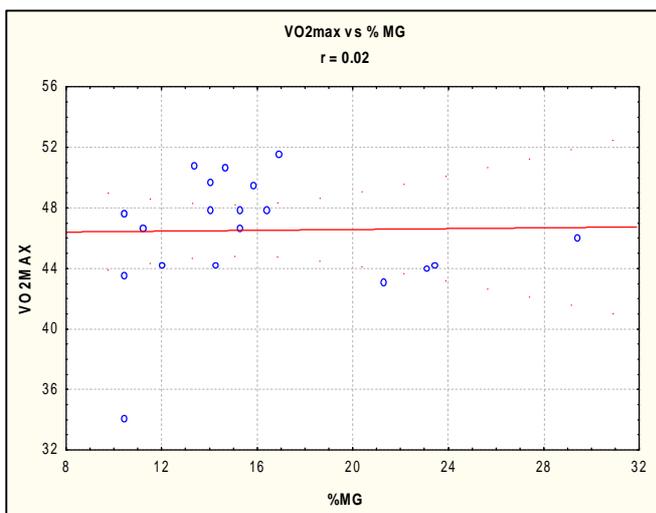
a 2



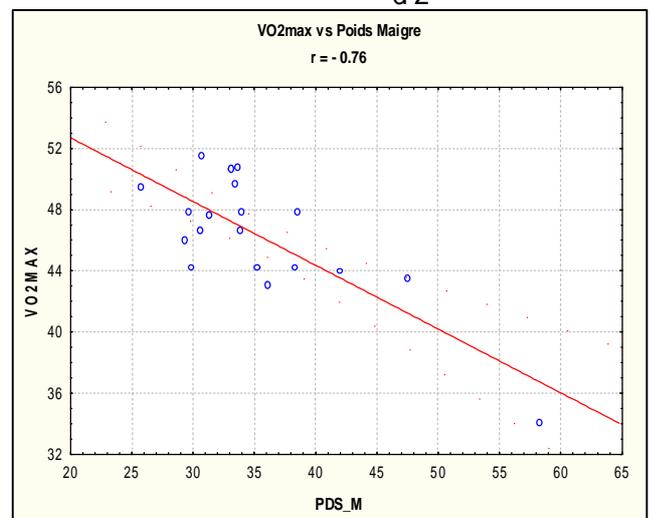
b 2



c 2



d 2



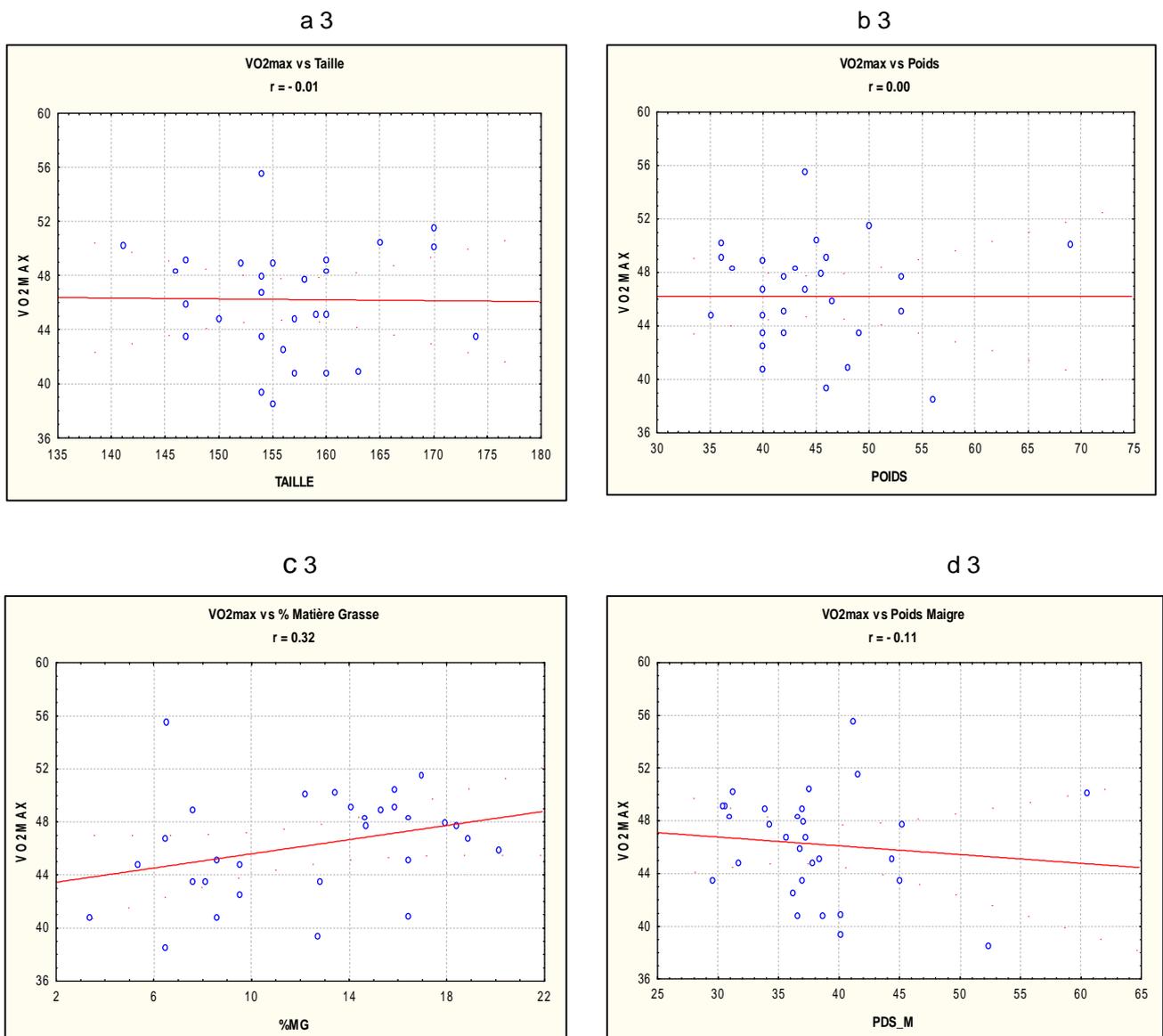
STADE PUBERTAIRE 3:

Au troisième stade pubertaire aucune corrélation significative de la VO2max des Filles n'est constatée avec tous les indices mesurés bien que le coefficient de corrélation avec le %MG soit bien plus élevé ($r = 0.32$) qu'avec les autres paramètres dont la valeur du coefficient varie de $r = -0.11$ pour le Poids Maigre à $r = 0.00$ pour le Poids.

Tableau 15 :

| Indices | TAILLE | POIDS | %MG | Pds Maig. |
|---------|--------|-------|------|-----------|
| Stade 3 | - 0.01 | 0.00 | 0.32 | - 0.11 |

*= *significatif*



STADE PUBERTAIRE 4:

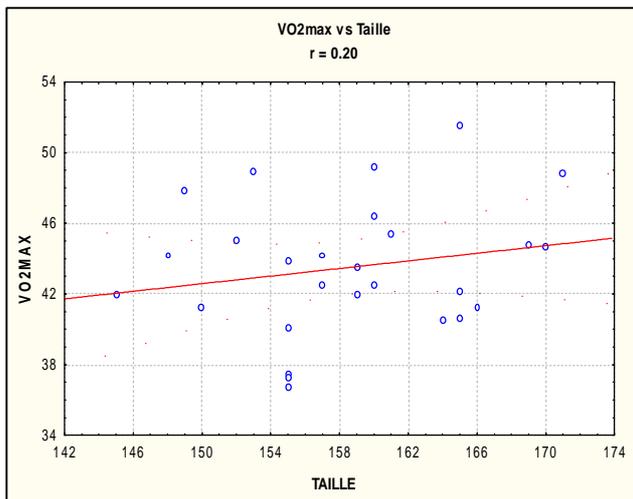
Bien que la relation de la VO2max avec la Taille et le %MG soit assez importante (tableau 14) aucune corrélation significative avec tous les indices anthropométriques n'est apparue durant le quatrième stade de la puberté.

Tableau 16.:

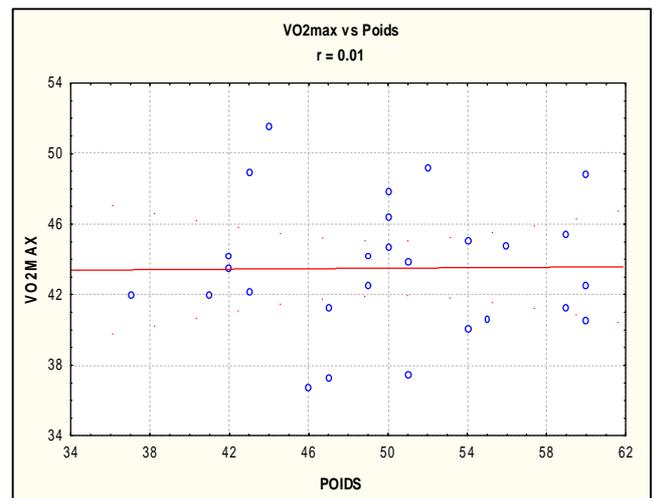
| Indices | TAILLE | POIDS | %MG | Pds Maig. |
|----------------|--------|-------|------|-----------|
| Stade 4 | 0.20 | 0.01 | 0.18 | - 0.05 |

* = significatif

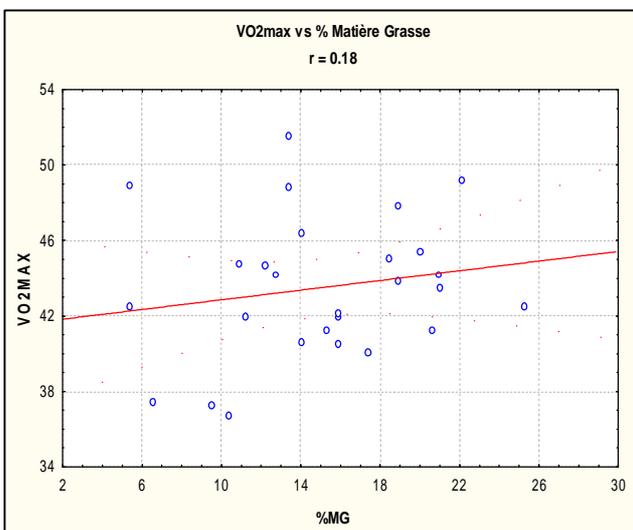
a 4



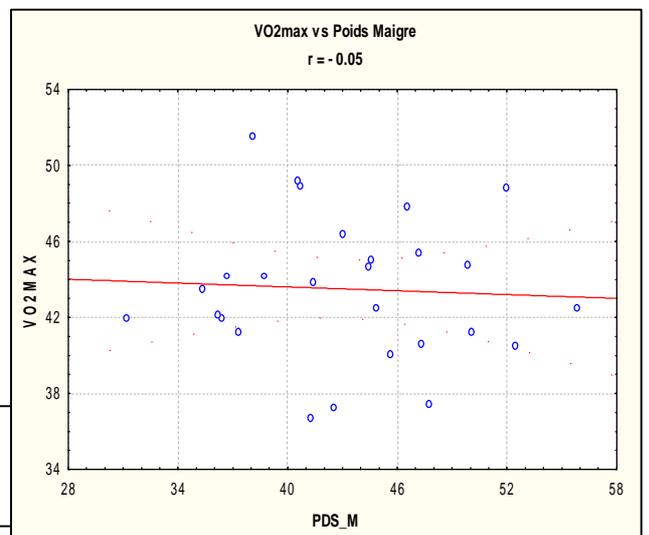
b 4



c 4



d 4



4.2. Evolution corrélative de la VO2max des Garçons avec les paramètres biométriques durant la puberté (coefficient de Pearson ; $p < 0.05$) :

STADE PUBERTAIRE 1 :

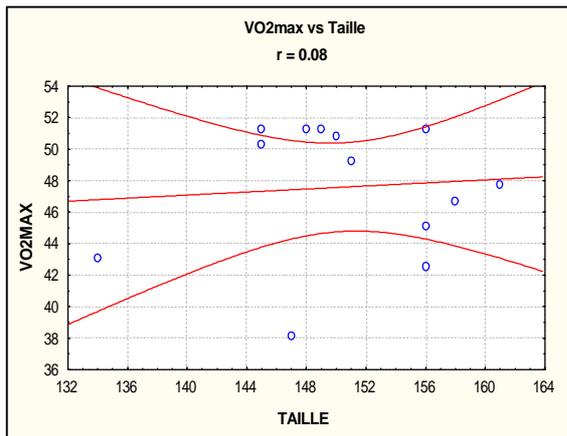
Contrairement aux filles au premier stade de la puberté aucune corrélation significative de la VO2max des garçons n'a été constaté avec les indices anthropométriques.

Tableau 17 :

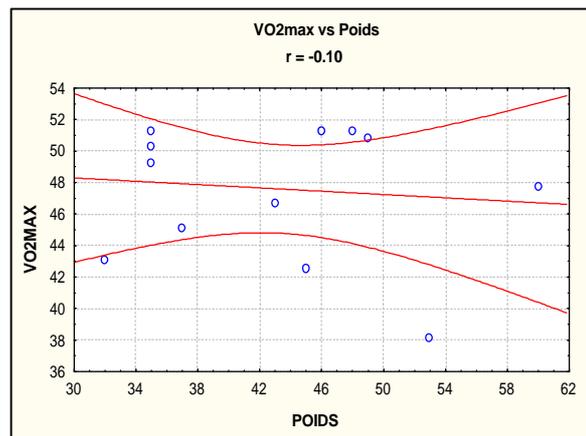
| Indices | TAILLE | POIDS | % M.G. | PDS. Maig. |
|---------|--------|-------|--------|------------|
| Stade 1 | 0.08 | -0.10 | -0.33 | 0.01 |

*= significatif

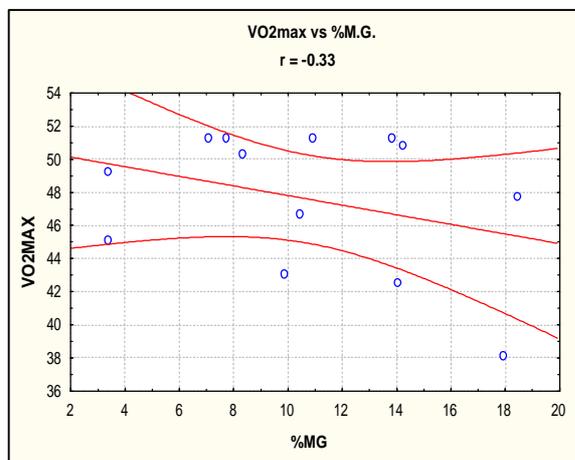
1a



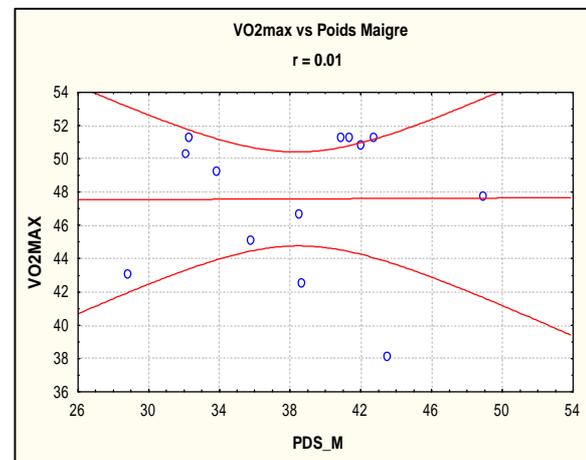
1b



1c



1d



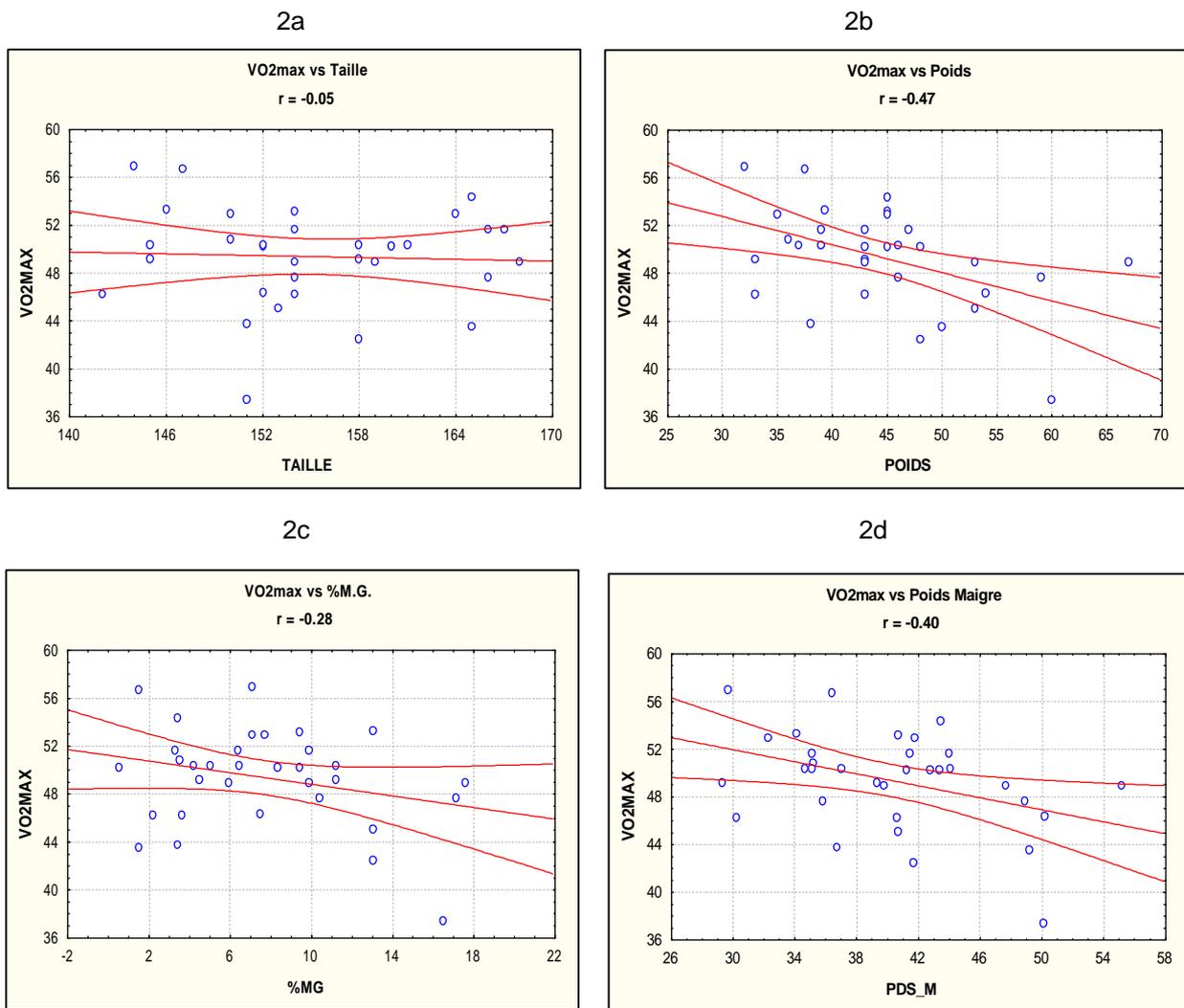
STADE PUBERTAIRE 2 :

Le second stade pubertaire des garçons se caractérise par une corrélation significative avec le Poids ($r = -0.47$) et le Poids Maigre ($r = -0.40$). Les corrélations avec la Taille et le %M.G. ne sont pas significatives.

Tableau 18 :

| Indices | TAILLE | POIDS | % M.G. | PDS. Maig. |
|---------|--------|--------|--------|------------|
| Stage 2 | -0.05 | -0.47* | -0.28 | -0.40* |

* = significatif



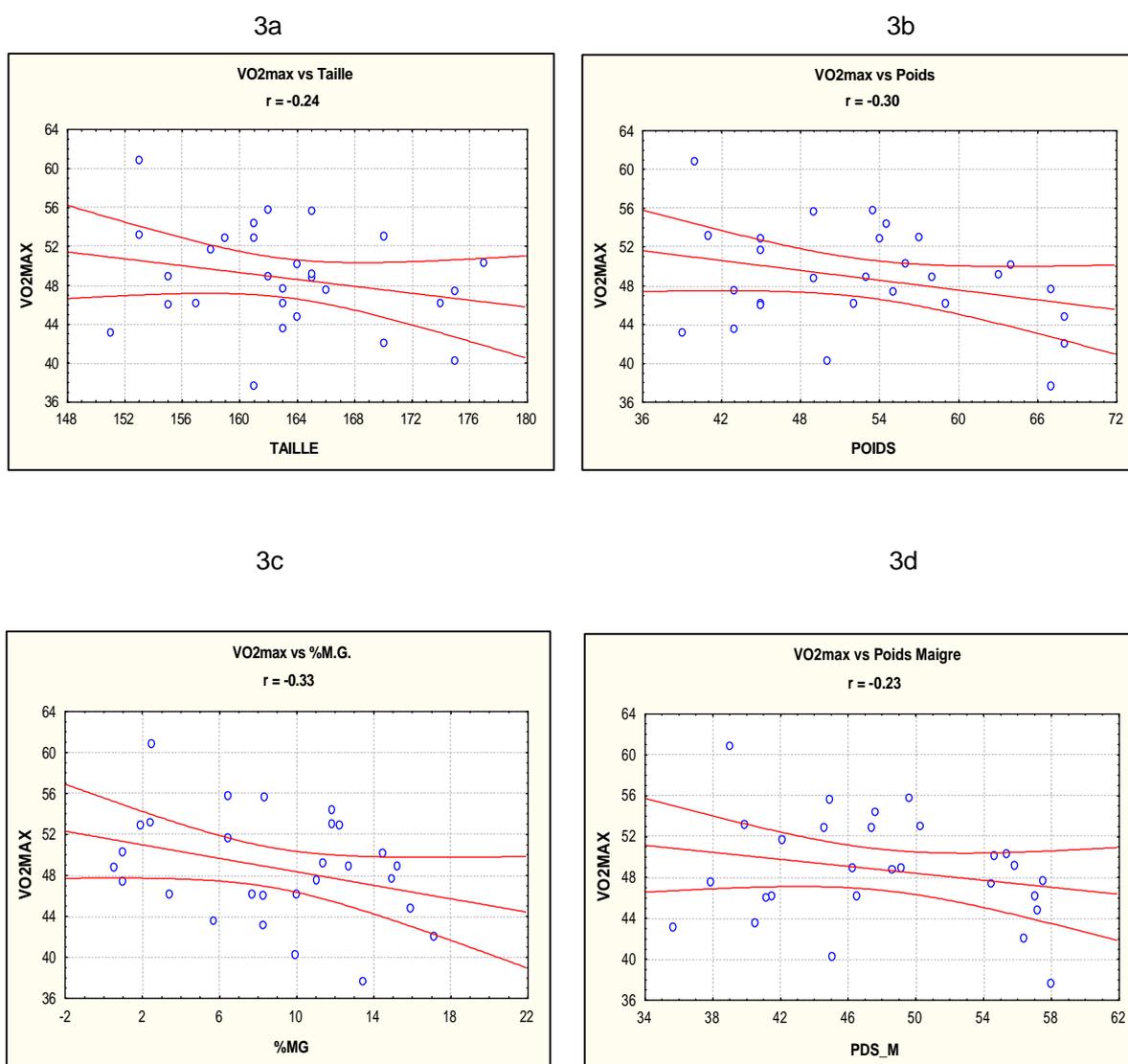
STADE PUBERTAIRE 3:

Au troisième stade de la puberté des garçons on ne constate aucune corrélation significative de la VO2max avec aucun des indices anthropométriques mesurés. Néanmoins on remarque que les corrélations sont toutes négatives.

Tableau 17 :

| Indices | TAILLE | POIDS | % M.G. | PDS. Maig. |
|---------|--------|-------|--------|------------|
| Stade 3 | -0.24 | -0.30 | -0.33 | -0.23 |

*= significatif



STADE PUBERTAIRE 4 :

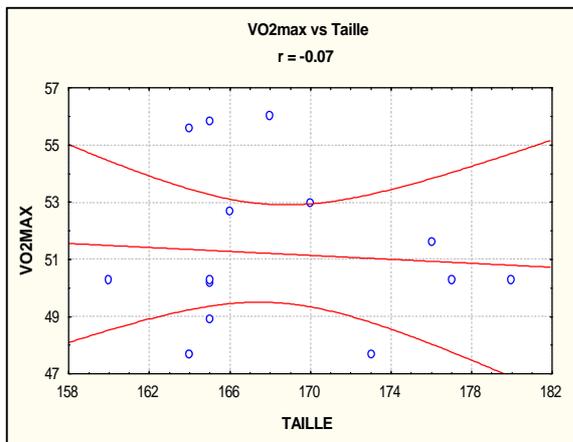
Comme pour les stades pubertaires 1 et 3 on ne relève aucune corrélation significative de la VO2max des garçons avec tous les indices.

Tableau 18 :

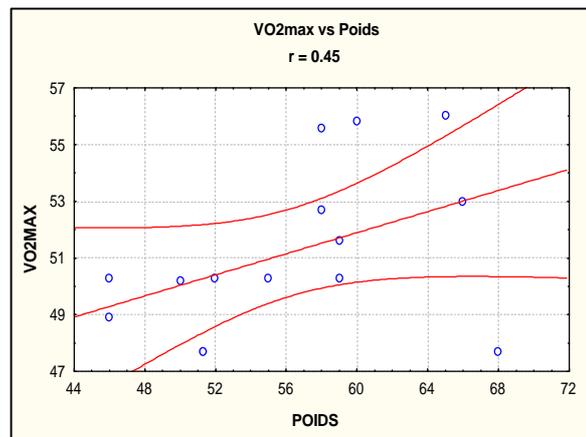
| Indices | TAILLE | POIDS | % M.G. | PDS. Maig. |
|---------|--------|-------|--------|------------|
| Stade 4 | -0.07 | 0.45 | 0.24 | 0.45 |

*= significatif

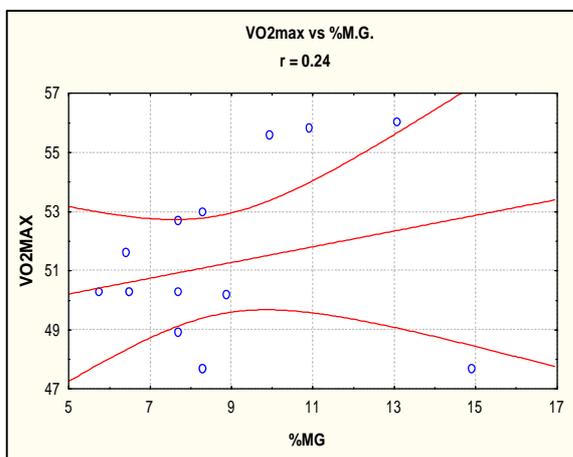
4a



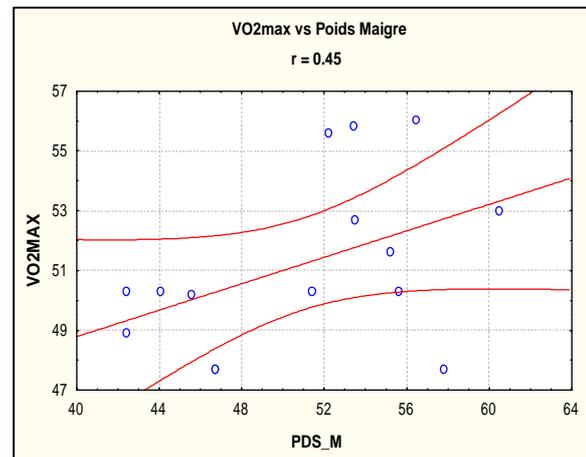
4b



4c



4d



DISCUSSION

DISCUSSION

Les vitesses de croissance et de maturation diffèrent parmi les enfants. Une variété de facteurs peut influencer la croissance et la maturation telles que l'héritage génétique, l'histoire nutritionnelle et l'état de santé général. La vitesse de changement est un élément important dans l'évaluation de la croissance et du développement des diverses dimensions du corps (Weineck, 1992). La taille et le poids sont communément reconnus comme reflétant les changements somatiques, d'autres indices représentent la croissance musculo-squelettique (âge osseux) et la maturation sexuelle (stades de Tanner). Tous les modèles qui décrivent la croissance montrent que les données de la croissance biologique varient (parfois d'une manière très importante) d'un enfant à l'autre et que la relation entre les séquences de la maturation et l'âge chronologique n'est pas toujours hautement prédictible. De manière similaire les réponses physiologiques aux exercices d'endurance ou aérobies développés par les différents modèles de croissance des enfants font apparaître des différences (parfois aussi très importantes) d'un enfant à l'autre (Rowland, 1993; S.K. Dey et Purthasarathi Debray, 2003).

La particularité de cette étude réside dans l'utilisation de la classification de Tanner (1962) selon les stades de la maturation biologique qui rend compte de l'évolution des différents paramètres morphologiques et des indices du développement pubertaire, leur influence sur la réponse physiologique observée à l'effort aérobique chez les jeunes à cette tranche d'âge.

Comme cela a été relevé dans la littérature (Pineau 1990 et 1991) tous les indices morphologiques des **filles** (*tableau 2, p.39*) ont évolué très significativement ($p < 0.001$) entre le premier et le quatrième stade pubertaire excepté le pourcentage de masse grasse (%M.G.) qui n'a pas augmenté significativement ainsi qu'une faible évolution du périmètre du biceps ($p < 0.05$). Cet important accroissement de la majorité des indices morphologiques a débuté

au deuxième stade pubertaire et s'est accentué entre les stades trois et quatre. Ainsi la maturation biologique se traduit par des accroissements significatifs chez les filles de tous les caractères morphologiques. Les plus significatifs se situent entre le second et le quatrième stade soit entre 12 et 13 ans. C'est précisément dans cet intervalle de temps qu'apparaît l'âge des premières menstruations qui coïncident avec le pic de croissance. Buckler, 1990 ; Sempé et coll., 1979, ont montré l'importance de la puberté au moment du pic de croissance sur le développement pondéral et statural.

On observe aussi dans notre population de filles, parallèlement à l'évolution significative des indices morphologiques, une augmentation non significative de la VO₂ max./PC (VO₂max/Poids du Corps) entre les stades 1 et 3 suivi d'une diminution significative ($p < 0,01$) de cette dernière entre les stades 3 et 4. La cause commune citée dans la littérature concernant la baisse de VO₂max/PC chez les filles et comme constaté dans notre échantillon, est la plus grande accumulation de graisse sous-cutanée durant et après la puberté (2-3-18-19). Bien que VO₂max/PC est supérieure à VO₂max/PM (VO₂max/Poids Maigre) aux quatre premiers stades de la puberté, particulièrement au stade 1 ($p < 0.001$), néanmoins on constate une évolution de VO₂max/PM avec une diminution significative au quatrième stade ($p < 0.05$). Ceci laisse supposer que la baisse de VO₂max/PC n'est pas liée uniquement au composant graisseux mais que d'autres facteurs interviennent aussi. Les aspects culturels ont aussi une influence sur les facteurs de l'activité physique chez les filles comme le soulignent aussi certains auteurs (Bar-Or, 1983 ; Krahenbuhl et coll., 1985).

Pour les **garçons** (tableau 4, p.42) les analyses de variance (ANOVA) révèlent une évolution très significative de la majorité de leurs indices morphologiques du premier au quatrième stade pubertaire qui est similaire à celle constatée par différentes études (9, 11, 13). Cette évolution est plus significative entre les stades

2 et 3, ce qui correspond au moment du pic de croissance très souvent signalé par plusieurs auteurs (7, 13, 19).

Par contre il est à noter l'absence d'une croissance significative du pourcentage de masse grasse (% M.G.) et sa relative stabilité. Cette stabilité a été constatée aussi dans d'autres études (4, 5). Ceci peut s'expliquer par les habitudes alimentaires en liaison avec les conditions sociales qui ne favorisent pas l'émergence d'un morphotype possédant une couche graisseuse importante. Par ailleurs il n'a été relevé aucune différence significative du périmètre de la cuisse à tous les stades pubertaires ceci étant vraisemblablement lié à l'augmentation de la masse musculaire d'une part, et d'autre part à une diminution de la masse grasse.

Par ailleurs $VO_2\text{max} / \text{Poids du Corps}$ ($VO_2\text{max}/PC$) a évolué de manière non significative entre un stade et le stade qui suit. Le fait qu'aucune augmentation notable de la $VO_2 \text{ max}/PC$ n'ait été constatée chez notre groupe de garçons aux différents stades pubertaires a été aussi été rapportée dans d'autres études (Eriksson et Saltin, 1974 ; Krahenbuhl et coll, 1985). Par contre on note que $VO_2\text{max}/PC$ et $VO_2\text{max}/\text{Poids Maigre}$ ($VO_2\text{max}/PM$) des garçons de notre population expérimentale ont augmentées significativement ($p < 0.01$) du premier stade pubertaire au quatrième stade pubertaire (de 47.59 ml.kg.mn à 51.21 ml.kg.mn, et de 42.53 ml.kgLBM.mn à 46.36 ml.kgLBM.mn) alors que les données de la littérature montrent une plus grande stabilité de la $VO_2 \text{ max}$ durant les différents stades de la puberté chez les jeunes européens ainsi que les canadiens . Bien que cela reste à confirmer par une étude plus approfondie ceci laisse supposer que nos garçons ont des potentialités d'endurance plus importantes comparés à leurs homologues occidentaux. Une étude faite par Tomkinson et al (2003) sur les enfants de 11 pays développés fait apparaître une tendance séculaire à la baisse de la $VO_2\text{max}$ durant les 20 dernières années.

Comparaison Filles/Garçons (tableau 11, p.49)

La puberté est indissociable de la croissance. Entre le premier et le dernier stade de la puberté tous les caractères morphologiques évoluent significativement, notamment au moment du pic de croissance (114, 116, 117).

La comparaison de l'évolution des indices morphologiques de nos deux populations révèle des différences très significatives pour tous les paramètres particulièrement à partir du troisième stade pubertaire. Ainsi on note chez les garçons une taille, un poids, un poids maigre et un périmètre de la cuisse très significativement supérieurs ($p < 0,001$) à ceux des filles durant le troisième stade de la puberté. Ceci s'explique par le fait que cette poussée de croissance survient en général chez les filles entre 11 et 13 ans, alors que chez les garçons elle apparaît un peu plus tard entre 13 et 15 ans (116, 117, 150). Ces intervalles de temps correspondent pour les filles au moment durant lequel apparaissent les premières menstruations et pour les garçons au pic de croissance lié à l'augmentation significative du taux de testostérone. Cela montre l'importance de la puberté au moment du pic de croissance lors du développement pondéral et statural mis en exergue par de nombreuses études (Buckler, 1990 ; Sempé et coll., 1979 ; Kemper, 1985 ; Pineau, 1991).

D'autre part on remarque que le pourcentage de masse grasse (% M.G.) des filles devient très significativement supérieur ($p < 0,001$) à celui des garçons à partir du second stade pubertaire qui correspond au début du pic de croissance des filles et l'apparition des premières règles (116). D'une manière générale la majorité des études faites sur des groupes mixtes, les auteurs constatent qu'il y a une plus grande accumulation de graisse sous-cutanée chez les filles à la puberté (3, 49, 97). Parallèlement à cela, la masse maigre (M.M.) des garçons très significativement supérieure ($p < 0,001$) à celle des filles à partir du deuxième stade pubertaire comme constatée dans notre étude, continue à évoluer jusqu'à l'âge de 18 ans (10). Selon la littérature, la cause de ces différences est liée à la régulation des hormones sexuelles, la testostérone et les oestrogènes (10, 33, 78).

Dans ce sens plusieurs études (33, 125) ont montré que la classification pubertaire est plus favorable que la traditionnelle classification par âge dans l'étude des aptitudes physiologiques, morphologiques et physiques des enfants en période pubertaire. Lorsque le développement est normal, l'âge chronologique et l'âge biologique concordent. Pour les sujets dont le développement est précoce, le déroulement des événements liés à la croissance est en avance d'une ou plusieurs années par rapport à leur déroulement normal. Chez les sujets tardifs le retard peut être d'une ou de plusieurs années (Goussard J.P. in : Manuel de l'entraînement, de J. Weineck, 1998).

Ainsi les sujets précoces ont, grâce à leurs plus grandes dimensions corporelles et des qualités d'aptitude physiques supérieures, une capacité d'adaptation aux séances d'EPS ou d'entraînement et des performances sportives meilleures que leurs camarades de même âge chronologique mais moins matures. Ceci devient plus problématique quand on a affaire à des groupes mixtes. L'influence la plus significative de la puberté se situe donc sur les accroissements du poids et de la stature entre 12 et 15 ans .

La période d'accélération passagère de la croissance durant la puberté présente un problème particulier : cette poussée de croissance survient en général chez les filles entre 11 et 13 ans, alors que chez les garçons elle apparaît entre 13 et 15 ans.

De nombreuses études ont montré que l'estimation du niveau de maturité biologique constitue un critère indispensable pour mieux apprécier le développement morphologique et physique des jeunes sportifs ou non-sportifs (14, 15, 38, 59, 76, 79). Sur le plan de la participation à des activités physiques et sportives, les sujets biologiquement retardés semblent désavantagés vis-à-vis des plus avancés. Cela n'est pas sans poser des difficultés à l'éducateur sportif lorsqu'il s'agit d'évaluer de façon équitable les conduites motrices et de détecter le talent de sujets qui évoluent à l'intérieur de groupes hétérogènes sur le plan développemental.

On constate, comme signalé dans la littérature, que le développement biologique n'évolue pas nécessairement de concert avec l'âge chronologique. Cette maturation biologique est la cause des importants changements dans les composants du corps (Bouchard, 1990 ; Malina et Bouchard, 1991). Comme on l'a relevé sur les enfants de notre échantillon, il existe une variation considérable entre les individus dans le timing des périodes de maturation. Durant le processus de maturation il apparaît clairement que les garçons ont un accroissement très significatif de leur masse musculaire, de leur force, de leur puissance et de leur endurance ainsi qu'une diminution de leur graisse sous-cutanée (Corbin et Pangrazi, 1998 ; Armstrong et Welsman, 2001). Cet accroissement des différents composants du corps et du potentiel physique est de bien moindre importance chez les filles particulièrement en ce qui concerne la force, la puissance et l'endurance, et ont tendance à une accumulation plus importante de graisse sous-cutanée que les garçons.

Par ailleurs sur le plan physiologique l'enfant pré-pubère se caractérise par un métabolisme aérobie relativement très développé par rapport à l'adulte. Les possibilités maximales aérobies ainsi que les activités enzymatiques musculaires de type oxydative (cycle de Krebs) sont égales et même le plus souvent supérieures à celles de l'adulte.

L'évolution comparative des puissances aérobies des deux groupes (filles et garçons) fait apparaître tout d'abord une consommation maximale d'oxygène (VO₂ max) des garçons supérieure à celle des filles à tous les stades de la puberté. Au stade 1 la différence de VO₂ max entre les deux sexes est non-significative pour notre population comme relevée sur les jeunes européens et américains (Armstrong et coll, 1994 ; Mirwald et Bailey, 1985 ; Rutenfranz et coll, 1981 ; Kemper, 1985).

La différence significative de la puissance aérobie entre nos filles et nos garçons débute à partir du stade 2 de la puberté et s'accroît d'une manière très significative au stade 3 puis au stade 4. Les auteurs sont unanimes à signaler

que la phase de stagnation intervient beaucoup plus tôt chez les filles que chez les garçons non-entraînés (Mano, 1994). Par la suite cet écart s'accroît et sera à l'origine des différences notables que l'on retrouvera à l'âge adulte. La différence de VO₂ max/Poids du Corps entre les deux sexes chez les jeunes est sans doute en relation avec les variations dans la composition corporelle, les garçons faisant apparaître un pourcentage de masse maigre plus important durant les années pré pubertaires, par contre les filles sont pénalisées par une accumulation plus grande de graisse sous-cutanée (Armstrong et coll, 1994).

Par ailleurs plusieurs études ont montré que l'âge biologique devra être pris en compte dans l'évaluation de la performance physique durant la croissance (11, 118). Dans ce sens très peu d'études se sont penchées sur l'évolution de l'aptitude aérobie des enfants et des adolescents en fonction du développement pubertaire (11, 85, 93, 102, 103, 122). Les données longitudinales relatives aux changements durant la croissance pubertaire et qui changent l'aptitude aérobie ne sont pas nombreuses, particulièrement pour les filles (Beunen et Malina, 1988 ; Krahenbuhl, Skinner et Kohrt, 1985 ; Malina, 1994). Beaucoup d'auteurs affirment que l'analyse appropriée et l'interprétation des données collectées lors d'expériences avec des sujets jeunes sont problématiques et devraient être considérées en relation avec la croissance et la maturation des enfants (Armstrong et Welsman, 2001 ; Kathleen et Mahoney, 1997).

Nos résultats révèlent que chez les filles il y a une corrélation très significative de la VO₂ max avec les indices de la Taille, du Poids et du Poids Maigre durant le premier et le second stade pubertaire. Par contre chez les garçons aucune corrélation significative n'a été relevée avec tous les indices morphologiques aux stades pubertaires 1, 3 et 4. Chez ces derniers on note qu'au stade 2 de la puberté il y a une corrélation significative mais négative de la VO₂max avec le Poids ($r = -0.47$) et le Poids Maigre ($r = -0.40$). Cette absence de corrélations significatives de la VO₂max des garçons avec les différents

paramètres morphologiques que l'on a constaté à tous les stades de la puberté laisse supposer que :

- premièrement l'accroissement de la VO₂max des garçons n'est pas toujours lié aux dimensions du corps comme l'ont conclu d'ailleurs certaines recherches (Armstrong et coll., 1991 et 1993 ; Sady et coll., 1981 ; Sady et coll., 1983) ;
- deuxièmement l'étude de l'évolution de l'aptitude aérobie en fonction du degré de maturation fait apparaître que les garçons plus matures ont une VO₂max supérieure à leurs camarades moins matures cela étant probablement dû à une masse musculaire plus importante et une concentration d'hémoglobine plus grande (Armstrong et coll., 1991 et 1999 ; Hansen et Klausen, 2004) ;
- troisièmement il est probable que les enfants plus matures ayant naturellement une meilleure aptitude anaérobie leur permet de résister plus longtemps durant les tests et par conséquent d'obtenir un meilleur résultat.

Il ressort des investigations menées dans le domaine du seuil anaérobie que le seuil lactate 4 mmol se situe en moyenne autour de 75-80% de la VO₂max chez l'enfant (Eriksson et al, 1973 ; Rostein et al, 1981 ; Thiebault et Sprumont, 1998). Ces valeurs ne sont pas significativement différentes de celles d'adultes moyennement sportifs mais sont supérieures à celles rencontrées chez l'adulte sédentaire (65-70 % de la VO₂max). Les mécanismes anaérobies sont mis en route pour une intensité relative plus faible chez la fille que chez le garçon (Thiebault et Sprumont, 1998).

Il faut souligner ici que certaines recherches ont montré que l'hérédité et la maturation avaient un impact important sur les résultats des tests d'aptitude à la performance (Bouchard et coll., 1992 ; Pangrazi et Corbin, 1990).

Bouchard et coll., (1992), ont montré que la trainabilité avait des limites génétiques très importantes. Ainsi certains individus reçoivent plus d'effets bénéfiques d'une activité physique régulière que d'autres. L'effet des séances

d'éducation physique et sportive suivies par les enfants de notre groupe expérimental ne montre pas une amélioration conséquente de la VO₂max/PC. Ceci a été observé dans d'autres études (26, 50, 90, 110) et peut être imputé aux protocoles des cours d'éducation physique et sportive.

La différence de puissance aérobie entre filles et garçons est attribuée aussi en partie aux différences dans les habitudes de leurs activités physiques et à la concentration d'hémoglobine (14, 63, 100, 131). Les garçons semblent physiquement plus actifs que les filles (Armstrong et coll., 1994 ; Meen, 2000). Ceci laisse penser que les filles atteignent plus vite leur niveau de maturité adulte. Dans notre population expérimentale on note que les filles sont en moyenne une année plus âgées que les garçons pour chaque stade pubertaire. Cette observation de valeurs toujours plus faibles des performances aérobies chez les filles devrait être prise en compte dans les programmes d'éducation physique et sportive. La proposition serait d'augmenter l'intensité de course dans les séances ainsi que le nombre et la durée des cycles visant le développement du potentiel aérobie des filles. En effet, l'efficacité d'un entraînement aérobie (mesuré par l'évolution de VO₂ max) a été démontré. Flandrois, Grandmontagne et coll. (1984) montrent que les filles entraînées ont toujours une VO₂ max supérieure aux sujets non entraînés et, chez les sujets sportifs, les auteurs n'observent plus de diminution de la VO₂ max. Etant donné que les améliorations sont fonction du niveau initial, ce type de sollicitation proposé pendant les séances d'éducation physique et sportive devrait permettre une réelle amélioration du potentiel aérobie chez les filles (comme chez les garçons) qui sont bien souvent sous entraînés par rapport aux garçons. L'entraînement améliore les capacités aérobies par l'augmentation de substrats, l'amélioration de l'efficacité enzymatique, une meilleure utilisation des lipides par rapport aux glucides et par l'amélioration de l'économie de course (Dupuis et Daudet, 2001). Un entraînement bien conduit augmente notablement la VO₂max, mais ce gain disparaît en quelques mois si l'on arrête de s'entraîner. Beaucoup d'auteurs pensent qu'un tel entraînement imposé dans la période pubertaire, serait

susceptible de modifier de façon irréversible certains acteurs du métabolisme aérobie (activités enzymatiques, nombre de mitochondries.....) (59, 65, 67, 151) .

Dans ce sens les épreuves de terrain telles que le test navette de Léger et Gadoury (1989) permettent de connaître la vitesse du dernier palier de ces épreuves. La connaissance de cette vitesse permet de mieux orienter l'entraînement que la connaissance de la valeur réelle de la VO₂max mesurée en laboratoire.

Les résultats que nous avons présentés dans cette étude montrent l'importance qu'il faut attribuer à l'âge physiologique comme critère essentiel dans toute étude portant sur les aptitudes physiques chez des sujets scolaires (ou sportifs) des deux sexes dans la période pubertaire. En effet, on ne peut difficilement imaginer qu'il soit possible de faire concourir des adolescents de maturité distincte car les conséquences seront malheureusement prévisibles et porteront préjudice aux sujets à puberté tardive. Ainsi, on peut regretter l'utilisation à tort et toujours en vigueur des tables de cotation utilisées en éducation physique pour le brevet sportif. De même, chez les sportifs, on ne peut pas apprécier les qualités physiques d'un athlète sans tenir compte de son degré de maturation et que vraisemblablement les sportifs les plus précoces sont provisoirement avantagés mais peut-être pas toujours ceux qui atteindront le plus haut niveau (Bousslimi et Pineau, 2001). C'est pourquoi, il est capital que les athlètes et les entraîneurs puissent, au moment de la puberté, juger objectivement et en fonction de la discipline pratiquée, les qualités physiques intrinsèques de l'athlète, sachant qu'elles seront nécessaires pour lui permettre d'atteindre un niveau élevé de performance.

CONCLUSION

CONCLUSION

Les recherches sur la capacité aérobie des enfants durant la croissance sont importantes pour la programmation des entraînements, la pratique athlétique et la rééducation cardiopulmonaire.

Il apparaît que les dispositions génétiques semblent intervenir pour une part non négligeable dans la détermination des performances physiques nécessitant un métabolisme aérobie. L'influence la plus significative de la puberté se situe sur les accroissements du poids, de la stature et des périmètres du corps entre les stades pubertaires deux et quatre. Les garçons se caractérisant durant cette période par une augmentation de la taille et du poids maigre, les filles montrant une augmentation de leur pourcentage de masse grasse. Dans notre étude l'incidence de la maturation biologique se traduit par des accroissements significatifs mais irréguliers entre les stades 1 et 4 de la majorité des caractères morphologiques. Durant la puberté, généralement entre 11 et 15 ans, les variations pour chaque sexe et entre les deux sexes augmentent grandement (Malina, 1989).

L'évolution différente dans la composition corporelle chez les jeunes des deux sexes ne semble pas être la seule cause de l'évolution significativement plus importante de la VO₂ max des garçons comparés aux filles particulièrement à partir du troisième stade de la puberté. D'autres facteurs liés à la maturation biologique ont certainement une incidence sur l'évolution différenciée de l'aptitude aérobie des enfants et des adolescents tels qu'une concentration d'hémoglobine plus importante chez les garçons ainsi qu'une aptitude anaérobie plus grande chez ces derniers. La différence dans le niveau d'activité physique entre les deux sexes liée aux facteurs culturels est aussi un élément à prendre en compte.

Ainsi pour des raisons différentes il apparaît nécessaire de commencer un travail d'endurance générale appuyé dès le deuxième stade pubertaire aussi bien pour les filles que pour les garçons. Les filles montrent une baisse très

significative de leur VO₂ max à partir du troisième stade pubertaire et les garçons subissent un accroissement très significatif de leur taille, leur poids et leur poids maigre à partir du second stade de la puberté.

Néanmoins l'absence d'une corrélation positive de la VO₂ max de nos garçons avec leur poids maigre contrairement à leurs homologues occidentaux et son évolution plus prononcée nous laisse penser que les facteurs génétiques semblent être la cause de ces différences ce qui reste bien sur à démontrer.

Notre étude met en évidence l'entraînabilité naturelle de l'endurance générale des jeunes des deux sexes, particulièrement pour les garçons, à partir du deuxième stade de la puberté. C'est à partir de cette période que se développent des processus d'adaptation fonctionnelle et structurale responsables de l'amélioration de la performance ou de sa limitation. Aussi, l'appréciation des résultats aux tests physiques sans tenir compte de l'âge pubertaire risque de sous-estimer ou de surestimer leurs valeurs et de fausser la détection et l'orientation de l'entraînement des jeunes. Les tests de laboratoire et de terrain représentent le moyen d'obtenir ces valeurs individuelles à intégrer à la gestion de l'entraînement et à la recherche de performance. En outre l'utilisation de la classification pubertaire permet de différencier d'une manière significative les potentialités des jeunes à même âge chronologique et par conséquent facilite l'orientation de l'entraînement.

L'évaluation objective des aptitudes physiques et particulièrement l'aptitude aérobie en fonction du stade de maturation biologique s'avère ainsi un élément clé et essentiel du processus d'entraînement, présent dans toutes les étapes de son déroulement pour modifier, corriger, ajuster, sélectionner et orienter la préparation du jeune sportif d'une manière plus adaptée à ses potentialités. La pratique d'une ou plusieurs disciplines sportives au moment de la croissance, nécessite que l'organisme de l'enfant soit surveillé et suivi pour qu'il bénéficie de l'acquis que peut apporter le sport à son organisme.

Cette étude fait partie d'un ensemble de recherches dont certaines ont été déjà présentées et d'autres sont en cours de réalisation. Ces dernières feront

l'objet d'une étude longitudinale qui portera sur l'évaluation des effets d'un entraînement en endurance sur l'aptitude aérobie des garçons et des filles durant le développement pubertaire.

BIBLIOGRAPHIE

1. **ACTES du COLLOQUE des ENTRETIENS de l'INSEP du 15-16 juin 2001.**
La santé du sportif de haut niveau. *Les cahiers de l'INSEP, n°31 : 88-101, 2001.*
2. **ANDERSEN K. L., SELIGER V., RUTENFRANZ J. and MESSEL S.** Physical performance capacity of children in Norway. Part III. Respiratory responses to graded exercise loading-population parameters in a rural community. *European Journal of Applied Physiology 33: 265-274, 1974.*
3. **ANDERSEN K. L., SELIGER V., RUTENFRANZ J. and STROBAK-KACZYNSKI J.** Physical performance capacity of children in Norway. Part IV. The rate of growth in maximal aerobic power and the influence of improved physical education of children in a rural community. *Eur. J. Appl. Physiol. 35 : 49-58, 1976.*
4. **ANDERSEN K. L., SELIGER V., RUTENFRANZ J. and NESSET T.** Physical performance capacity of children in Norway: The influence of social isolation on the rate of growth in body size and composition and on the achievement in lung function and maximal aerobic power of children in a rural community. *Eur. J. of Appl. Physiol., 45: 155-66, 1980.*
5. **ANDERSEN K.L., ILMARINEN J., RUTENFRANZ J., OTTOMAN N., BERNDT I., KYLIAN H. and RUPPEL M.** Leisure time sport activities and maximal aerobic power during late adolescence. *Eur. J. Appli. Physiol., 52 : 431-6, 1984.*
6. **AMERICAN COLLEGE of SPORTS MEDECINE.** The recommended quantity and quality of exercise for developing cardiorespiratory fitness and muscular fitness in healthy adults. *Med. Sci. Sports, 22: 265-74, 1990.*
7. **ARMSTRONG N. and DAVIES B.** An ergometric analysis of age group swimmers. *Br. J. Sports Med., 15: 20-26, 1981.*
8. **ARMSTRONG N., BALDING J., GENTLE P. and KIRBY B.** Patterns of physical activity among 11 to 16 year old British children. *Br. Med. J. 301: 203-205, 1990a.*
9. **ARMSTRONG N. and BRAY S.** Physical activity patterns defined by heart rate monitoring. *Arch. Dis. Child. 66: 245-247, 1991.*
10. **ARMSTRONG N., WELSMAN J.R. and KIRBY B.** Daily physical activity estimated from continuous heart rate monitoring and laboratory indices of

aerobic fitness in pre-adolescent children. *Res. Q. Exerc. Sport* 64 : (suppl.) A24, 1993.

11. **ARMSTRONG N., McMANUS A.M. and WELSMAN J.R.** Children's aerobic fitness. *Br. J. Phys. Educ.* 25: 9-11, 1994.
12. **ARMSTRONG N., McMANUS A.M., WELSMAN J.R. and KIRBY J.** Aerobic fitness of pre pubescent children. *Ann. Hum. Biol.* 22: 427-441, 1995.
13. **ARMSTRONG N. and WELSMAN J.R.** Assessment and Interpretation of aerobic fitness in children and adolescents. *Int. J. Sports Med.* 17: 356-359, 1996.
14. **ARMSTRONG N., WELSMAN J.R, NEVILL A.M. and KIRBY B.J.** Modelling growth and maturation changes in peak oxygen uptake in 11-13 yr olds. *J. Applied Physiol.* , 87: 2230-2236, 1999.
15. **ARMSTRONG N. and WELSMAN J.R.** Peak oxygen uptake in relation to growth and maturation in 11- to 17-year-old humans. *Eur J Appl Physiol*, 85: 546-51, 2001.
16. **ASTRAND P. O. and RYHMING I.** A nomogram for calculation of aerobic capacity from pulse rate during submaximal work. *J. Appl. Physiol.*, 7: 218-221, 1954.
17. **ASTRAND P. O. et RODAHL K.** Manuel de physiologie de l'exercice musculaire. *Masson, Paris (1973).*
18. **ASTRAND P. O.** The child in sport and physical activity-physiology. J. G. Albinson and G. M. Andrew (ed.). *Child in sport and physical activity. Baltimore. University Park Press, pp. 19-33, 1976.*
19. **ASTRAND P. O. et RODAHL K.** Précis de physiologie de l'exercice musculaire. *Masson, Paris (1980).*
20. **ASTRAND P. O. and RODAHL K.** Textbook of work physiology, *McGraw Hill, New York (1986).*
21. **ATOMI Y., IWAOKA K., HATTA H., MIYASHITA M. and YAMAMOTO Y.** Daily physical activity levels in preadolescent boys related to VO₂ max and lactate threshold. *Eur. J. Appl. Physiol.* 55 : 156-161, 1986.
22. **BAQUET G., BERTHOIN S., DUPONT G., BLONDEL N., FABRE C. and Van PRAAGH E.** Effects on high intensity intermittent training on peak VO₂ in prepubertal children. *Int J Sports Med*, 23 (6): 439-44, 2002.
23. **BAQUET G., BERTHOIN S. and Van PRAAGH E.** Are intensified physical education sessions able to elicit heart rate a sufficient level to promote aerobic fitness in adolescents? *Res Q Exerc Sport*, 73 (3): 282-8, 2002.

24. **BALE P.** Pre- and post-adolescents' physiological response to exercise. *Br. J. Sports Med.*, 15: 246-249, 1981.
25. **BARRAULT D.** Etude de la dépense énergétique aérobie chez l'athlète de haute compétition et de ses variations selon l'activité physique pratiquée. *Thèse de médecine, Académie de Paris, Faculté de Médecine Saint-Antoine, 1976.*
26. **BAR-OR O.** Pediatric sports medicine for the practitioner. *New York: Springer-Verlag, 1983.*
27. **BAR-OR O.** Trainability of prepubescent child. *Phys. Sports Med.* 17 : 5, 65,82, 1989.
28. **BAXTER-JONES A.D.G. and MAFFULI N.** Endurance in young athletes: it can be trained. *Br J Sports Med*, 37: 96-97, 2003.
29. **BEDU M., FALGAIRETTE G., Van PRAAGH E., FELLMANN N., SPIELVOGEL H. et COUDAT J.** Relation fréquence cardiaque-puissance à haute et basse altitudes chez l'enfant. *Journées d'automne de l'ACAPS, Beaune, 1985.*
30. **BENEDICT G., VACCARO P. and HATFIELD B.D.** Physiological effects of an eight precision jump rope program in children. *American Corrective Therapy Journal*, 5: 108-111, 1985.
31. **BERTRAND J., RAPPAPORT R. et SIZONENKO P.C.** Endocrinologie pédiatrique. *Payot, Lausanne et Doin, Paris, pp. 335-360, 1982.*
32. **BEUNEN G., BAXTER-JONES A.D.G., MIRWALD R.L. THOMIS M., LEFEVRE J., MALINA R.M. and BAILEY D.** Intraindividual allometric development of aerobic power in 8- to 16-year-old boys. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34 (3): 503-10, 2002.
33. **BEUNEN G., MALINA R.M., OSTYN M., RENSON R. and Van GERVEN D.** Fatness, growth and motor fitness of Belgian boys 12 through 20 years of age. *Human Biology*, vol. 55, n°3: 599-613, 1983.
34. **BEUNEN G. and MALINA R.M.** Growth and physical performance relative to the timing of the adolescent spurt. *Exerc. Sports Sci. Rev.*, 16 : 503-540, 1988.
35. **BOSQUET L., LEGER L. et LEGROS P.** Les méthodes de détermination de l'endurance aérobie. *Science et Sports*, 15 : 55-73, 2000.
36. **BOUCHARD C., LESAGE R., LORTIE G. and al.** Aerobic performance in brothers, dizygotic and monozygotic twins. *Med. Sci. Sports Exercise*, 4: 1-51, 1986.

37. **BOUCHARD C., DIONNE F.T., SIMONEAU J. and BOULAY M.** Genetics of aerobic and anaerobic performances. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 20: 27-58, 1992.
38. **BOUSLIMI J. et PINEAU J.-C.** Adolescents en pratiques sportives. Eds *l'Harmattan*, 232 p., 2001.
39. **BRAUNER R., LIMAL J.M. et RAPPAPORT R.** Précocité et retards pubertaires. In : La puberté normale et pathologique chez la fille. *Encycl. Med. Chir. (Paris)*, 36 A¹⁰: 1-19, 1984.
40. **BRAUNER R., MANDEL C. et RAPPAPORT R.** Le développement et la croissance pubertaires normaux. *Science et Sports*, 1 : 337-343, 1986.
41. **BRUE F., MELIN B. et LAMAND J.F.** Détermination de l'aptitude différentielle aérobie-anaérobie sur un nouveau type de cycloergomètre. *Cinésiologie* 24 : 341-345, 1985.
42. **BRUE F., PHILIPPE Y. and LEGER L.** Le test de vitesse maximale aérobie derrière cycliste. *Med. Armées* 16 : 605-610, 1988.
43. **BOUIX O., BRUN J.F., FEDU C., MICALLEF J.P., CHATPIAT A., RAMA D., et ORSETTI A.** Exploration de gymnastes adolescents de classe sportive : quel suivi médical pour la croissance et la puberté ? *Science et Sports*, 12 : 51-65, 1997.
44. **BUCKLER J.** A longitudinal study of adolescent growth. *Springer Verlag, London, Berlin*, 430 p. (1990).
45. **CAMUS F., CHAUSSAIN M., MONOD H. et TEILLAC A.** Validité de l'estimation de la capacité aérobie maximale chez l'homme. *J. Physiol. (Paris)* 69-189, 1974.
46. **CORBIN C.B. and PANGRAZI R.P.** Physical activity for children: A statement of guidelines. *Reston, VA: NASPE Publications (AAHPERD National Guidelines)*, 1998.
47. **COSTILL D.L., MAGLISCHO E.W. and RICHARDSON A.B.** La Natation. *Editions: Vigot*, 209 p., 1994.
48. **COOPER K.H.** A mean of assessing maximal oxygen intake. Correlation between field and treadmill testing. *J. Am. Med. Assoc.*, 203: 201-204, 1968.
49. **CUMMING G.R.** Current levels of fitness. *Can. Med. Assoc. J.* 96: 868-877, 1967.
50. **CUMMING G.R. and KEYNES R.A.** A fitness performance test for school children and its correlation with physical capacity and maximal oxygen uptake. *Journal of The Canadian Medical Association*, 96: 1262-9, 1967.

- 51. CUNNINGHAM D.A., PATERSON D.H., BLIMKIE C.J.R. and DONNER A.P.** Development of cardiorespiratory function in circumpubertal boys: A longitudinal study. *Journal of Applied Physiology*, 56: 302-307, 1984.
- 52. DAS K.K. and DHUNDASI S.A.** Physical fitness: a longitudinal study among muslim children of Bijapur (Karnataka). *Indian J Physiol Pharmacol*, 45 (4): 457-62, 2001.
- 53. DAVIES C.T.M., BARNES C. and GODFREY S.** Body composition and maximal exercise performance in children. *Human Biology*, 44: 195-214, 1972.
- 54. DANIELS J. and OLDRIDGE N.** Changes in oxygen consumption of young boys during growth and running training. *Medicine and Science in Sport and Exercise*, 3: 161-5, 1971.
- 55. DEKKAR N.** L'enfant et le sport. *CNIDS, Sciences du Sport n°4*, 1996.
- 56. DELAUNEY A. et DESCHAMPS J.** Etude de la croissance staturale et pondérale des adolescents en fonction du stade pubertaire. *Biotypologie*, 17 : 217-235, 1956.
- 57. DEY S.K. and PARTHASARATHI D.** A comparative study of maximal aerobic power of school boys of east and north-east regions of India. *Indian Pediatrics* ; 40: 105-114, 2003.
- 58. DUPONT G., BERTHOIN S. et GERBEAUX M.** Performances lors d'un exercice intermittent anaérobie : comparaison entre enfants et sujets matures. *Sciences & Sports*, 15 : 147-53, 2000.
- 59. DUPUIS J-M. et DAUDET G.** Médecine du sport de l'enfant et de l'adolescent. *Eds Ellipses*, 170p., 2001.
- 60. DURNIN J. and RAHAMAN M.** The assessment of amount of fat in the human body from measurements of skinfold thickness. *Br. J. Nutr.* 21: 681-689 (1967).
- 61. EKBLUM B.** Effect of physical training in adolescent boys. *Journal of Applied Physiology*, 27 : 350-55, 1969.
- 62. EKELUND U., FRANKS P.W., WAREHAM N.J. and AMAN J.** Oxygen uptakes adjusted for body composition in normal-weight and obese adolescents. *Obes Res*, 12(3): 513-20, 2004.
- 63. EKELUND U., YNGVE A., BRAGE S., WESTERTERP K. and SJOSTROM M.** Body movement and physical activity energy expenditure in children and adolescents: how to adjust for differences in body size and age. *Am J Clin Nutr*, 79(5): 851-6, 2004.

- 64. ENGSTROM L.M. and FISCHBEIN S.** Physical capacity in twins. *Acta Genet. Med. Gemellol*, 26: 159-65, 1977.
- 65. ERIKSSON B.O., KARLSSON J. and SALTIN B.** Muscle metabolites during exercise in puberty boys. *Acta Paediatrica Scandinavia*, 217(suppl.):154-157, 1971.
- 66. ERIKSSON B.O.** Physical training and muscle metabolism in 11-13 years old boys. *Acta Physiologica Scandinavia*, 384: 1-48 (suppl.), 1972.
- 67. ERIKSSON B.O. and SALTIN B.** Muscle metabolism during exercise aged 11 to 16 years compared to adults. *Acta Paediatrica Belgica*, 28: 257-65, 1974.
- 68. FARDY P.S. and HELLERSTEIN H.K.** A comparison of continuous and intermittent progressive multistage exercise testing. *Med. Sci. Sports*, 10: 7-12, 1975.
- 69. FELLMAN N., BEDU M., SPIELVOGEL, FALGAIRETTE G., Van PRAAGH E. and al.** Anaerobic metabolism during puberty development high altitude. *J. Appl. Physiology*, 64: 1382-1386, 1988.
- 70. FERNHALL B. and UNNITHAN VB.** Physical activity, metabolic issues and assessment. *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.*, 13(4): 925-47, 2002.
- 71. FLANDROIS R., GRANDMONTAGNE M., MAYET MH., FAVIER R., et FRUTOSO J.** La consommation maximale d'oxygène chez le jeune français, sa variation avec l'âge, le sexe et l'entraînement. *J. Physiol.*, 78 : 186-94, 1982.
- 72. FOUILLOT J.P., BARRAULT D. et SCHLOTERRER M.** Etude de la relation entre la consommation d'oxygène maximale et la distance parcourue au cours d'un test de durée constante. *Communication à l'association des physiologistes, 44^e réunion, Clermont-Ferrand. J. Physiol. (Paris) 72 ;, A7, 1976.*
- 73. FOX E.** A simple accurate technique for predicting maximal aerobic power. *J. Appl. Physiol.*, 35: 914-916, 1973.
- 74. FRANCIS K. and CUIPEPPER M.** Validation of a 3 minute height-adjusted step-test. *J. Sport Med.*, 28: 229-233, 1988.
- 75. GADOURY C. et LEGER L.** Validité de l'épreuve de course navette de 20 m avec paliers de 1 minute et du physi-test canadien pour prédire VO₂ max des adultes. *Revue des STAPS 7* : 57-68, 1986.
- 76. GERBEAUX M. et BERTHOIN S.** Aptitude et pratique aérobique chez l'enfant et l'adolescent. *Eds PUF, 2000.*

- 77. GODIN P.** La puberté. Détermination des étapes « pré » et « post » pubertaires et de la durée de chacune. *Soc. Pédiatr.*, 32 : p. 73, 1934.
- 78. GREULICH W.W. and PYLE S.I.** Radiographic Atlas of Skeletal Development of the hand and the wrist. 2e ed., Stanford University Press, Stanford, California, 1959.
- 79. HANSEN L. and KLAUSEN K.** Development of aerobic power in pubescent male soccer players related to hematocrit, hemoglobin and maturation. A longitudinal study. *J Sports Med Phys Fitness*, 44(3): 219-23, 2004.
- 80. HARREL J.S., MCMURRAY R.G., BAGGET C.D., PENNEL M.L., PEARCE P.F. and BANGDIWALA S. I.** Energy costs of physical activities in children and adolescents. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37(2): 329-336, 2005.
- 81. HERMANSEN L. and OSEID S.** Direct and indirect estimation of oxygen uptake in pre-pubertal boys. *Acta Paediatrica Scandinavia*, 217: 18-23 (suppl.), 1971.
- 82. HOLLMAN W. and HETTINGER T.** Sportmedizin Arbeitsund Trainingsgrundlagen. *F.K. Schattauer Verlag, Stuttgart*, 1976.
- 83. JANZ K.F., DAWSON J.D. and MAHONEY L.T.** Increases in physical fitness during childhood improve cardiovascular health during adolescence: the Muscatine Study. *Int J Sports Med*, 23(suppl 1): 15-21, 2002.
- 84. JOHNSTON K.N., JENKINS S.C. and STICK S.M.** Repeatability of peak oxygen uptake in children who are healthy. *Pediatric Physical Therapy*, 17(1): 11-17, 2005.
- 85. KATHLEEN F. Janz and MAHONEY Larry T.** Research Quaterly for Exercise and Sport. *The American Alliance for Health, Physical Education, Recreation and Dance*, vol. 68, n°1: pp.1-9, 1997.
- 86. KEMPER H.C.G. and VERSCHUUR R.** Maximal aerobic power in 13 and 14 year old teenagers in relation to biologic age. *Int. J; Sports Med.*, 2: 97-100, 1981.
- 87. KEMPER H.C.G.** Growth, health and fitness of teenagers. *Medicine and Sports Science*, vol. 20, Ed. Hebbelinck: 202 p., 1985.
- 88. KEMPER H.C.G.** Longitudinal studies on the development of health and fitness and the interaction with physical activity of teenagers. *Pediatry*, 13: 52-9, 1986.
- 89. KEMPER H.C.G. et Van de KOP H.** Entraînement de la puissance maximale aérobie chez les enfants pré pubères et pubères. *Science et Sports* 10 : 29-38, 1995.

- 90. KLISSOURAS V. and WEBER G.** Training: growth and heredity *in: BAR-OR O. (ed.) Pediatric Work Physiology. Proceedings of the Fourth International Symposium, Tel Aviv, Technodaf: 209-15, 1973.*
- 91. KOBAYASHI K., KITAMURA K., MIURA M., SODEIMAH., MURASA Y., MIYASHITA M. and MATSUI H.** Aerobic power as related to body and training in Japanese boys: a longitudinal study. *Journal of Applied Physiology*, 4: 666-72, 1978.
- 92. KOCH G.** Aerobic power lung dimensions, ventilatory capacity, and muscle blood flow in 12-16 year old boys with high physical activity *in Children and Exercise (edited by K. Berg and B.O. Erikson), vol. 9, pp. 64-8. Baltimore: University Park Press, 1980.*
- 93. KRAHENBUHL G.S., SKINNER S. and KOHRT W.M.** Development aspects of maximal aerobic power in children. *Exercise Sport Science Revue*, 13: 503-538, 1985.
- 94. LACOUR J.R., PADILLA-MAGUNACELAT S., BARTHELEMY J.C. and DORMOIS D.** The energetic of middle distance running. *Eur. Appl. Physiol.*, 60 : 38-43, 1990.
- 95. LARGO R.H., GASSER T., PRADER A., STUETZLE W. and HERBER P.J.** Analysis of the adolescent growth spurt using smoothing spline functions. *Ann. Hum. Biol.* 5: 421-434, 1979.
- 96. LEGER L.** Test progressif de course sur piste de l'université de Montréal (Léger et Boucher). Tests d'évaluation de la condition physique de l'adulte. Capacité aérobie. *Fascicule B-5, Ministère du loisir, de la chasse et de la pêche, Comité Kino-Québec (1981a).*
- 97. LEGER L. et LAMBERT J.** A maximal multistage 20 m shuttle run test to predict VO₂ max. *Eur. J. Appl. Physiol.* 49 : 1-12, 1982.
- 98. LEGER L., LAMBERT J., GOULET A., ROWAN C. et DINELLE Y.** Capacité aérobie des Québécois de 6 à 17 ans. Test navette de 20 m avec palier de 1 mn. *Can. J. Appl. Spt. Sci.*, 9: 64-69, 1984.
- 99. LEGER L. et GADOURY C.** Validity of a the 20 m shuttle run test with 1 mn stages to predict VO₂ max. in adults. *Can. J. Appl. Spt. Sci.* 14: 21-26, 1989.
- 100. LeMURA L.M., Von DULLIVARD S.P., CARLONAS R. and ANDREACCI J.** Can exercise training improve maximal aerobic power (VO₂max) in children: a meta-analytic review. *Journal of Exercise Physiology online*, Vol 2, n°3: 1-22, 1999.
- 101. MALINA R.M.** Anthropometric correlates of strength and motor performance. *In: Exercise and Sport Sciences Reviews* 3: pp. 249-274, 1975.

102. **MALINA R.M. and BOUCHARD C.** Growth, maturation and physical activity. *Champaign, Illinois, Human Kinetics, 1991.*
103. **MALINA R.M. and BEUNEN G.** Growth and maturation: methods of monitoring. *In Encyclopedia of Sports Medicine: The Child and Adolescent Athlete, Vol. 22, O. Bar-Or (Ed.). Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1994.*
104. **McARDLE W., KATCH F. and PECHARD G.** Comparison of continuous and discontinuous treadmill and bicycle test for VO₂ max. *Med. Sci. Sports 10: 156-160, 1973.*
105. **MAHON A.D. and VACCARO P.** Ventilatory threshold and VO₂ max changes in children following endurance training. *Med. Sci. Sports Exerc. 21 : 425-431, 1989.*
106. **MANDIGOUT S., LECOQ A.M., COURTEIX D., GUENON P. and OBERT P.** Effect of gender in reponse to an aerobic training programme in prepubertal children. *Acta Paediatrica, Vol 90, n°1: 9-15, 2001.*
107. **MANNO. R.** Les qualités physiques entre 6 et 14 ans. *Revue EPS n°249 : 31-34, 1994.*
108. **MARGARIA R., AGHEMO P. and ROVELLI E.** Indirect determination of maximal O₂ consumption in man. *J. Appl. Physiol. 20: 1070-1073, 1965.*
109. **MATECKI S., PRIOUX J., AMSALLEM F., MERCIER J., PREFAUT C. and RAMONATXO M.** Maximal oxygen uptake in healthy children: factors of variation and available standards. *Rev Mal Respir., 18(5): 499-506, 2001.*
110. **MEEN H.D.** Physical activity in children and adolescents in relation to growth and development. *Tidsskr Nor Laegeforen, 120 (24): 2908-14, 2000.*
111. **MIRWALD R.L., BAILEY D.A., CAMERON N. and RASMUSSEN R.L.** Longitudinal comparison of aerobic power in active and inactive boys aged 7 to 17 years. *Annals of Human Biology 8: 405-414, 1981.*
112. **MIRWALD R.L. and BAILEY D.A.** Longitudinal analysis of maximal aerobic power in boys and girls by chronological age, maturity and physical activity. *Saskatoon, University of Saskatchewan, 1985.*
113. **MIRWALD R.L. and BAILEY D.A.** Maximal aerobic power. *London, Ontario: Sports Dynamics, 1986.*
114. **MOTA J., GUERRA S., LEANDRO C., PINTO A., RIBEIRA J.C. and DUARTE J.A..** Association of maturation, sex, and body fat in cardiorespiratory fitness. *Am J Hum Biol, 14(6): 707-12, 2002.*

115. **MULLER M.J., GRUND A., KRAUSE H., SIEWERS M., BOSY-WESTPHAL A. and RIECKERT H.** Determinants of fat mass in prepubertal children. *Br J Nutr*, 88(5): 545-54, 2002.
116. **MURASE Y., KOBAYASHI K., KAMEI S. and MATSUI H.** Longitudinal study of aerobic power in superior junior athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 13: 180-84, 1981.
117. **NAKAGAWA A. and ISHIDO T.** Assessment of aerobic capacity with special reference to sex age of junior and senior high school students in Japan. *Jap. J. Physiol.* 20 : 118-129, 1970.
118. **NEUNDORF E. and SCHWARTZ V.** Maximal aerobic power and growth in boys and girls aged 10 to 17 years. *Int. J. Sports Med.* 17: 1996.
119. **NOAKES T.D.** Implications of exercise testing for prediction of athletic performance: a contemporary perspective. *Med. Sci. Sports Exerc.* 20: 319-330, 1988.
120. **OBERT P., MANDIGOUT S., VINET A. and COURTEIX D.** Effect of a 13-Week aerobic training programme on the maximal power developed during a force-velocity in prepubertal boys and girls. *Int J Sports Med*, 22: 442-446, 2001.
121. **PANGRAZI R.P. and CORBIN C.B.** Age as a factor relating to physical fitness test performance. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 61: 410-414, 1990.
122. **PATE R.R. and SHEPHARD R.J.** Characteristics of physical fitness in youth. In C.V. Gisolfi and D.R. Lamb (Eds), *Perspectives in exercise science and sports medicine: youth, exercise, and sport*. Indianapolis, In: Berchmark press: 1-41, 1989.
123. **PATTON J.F., VOGEL J.A. and MELLO R.P.** Evaluation of maximal predictive cycle ergometer test of aerobic power. *Euro. J; Appl. Physiol.* 49 : 131-140, 1982.
124. **PAYNE V.G. and MORROW J.R.** The effect of physical training on prepubescent VO₂ max.: a meta-analysis. *Res. Q. Exerc. Sport* 64 : 305-313, 1993.
125. **PFEIFFER R. and FRANCIS R.S.** Effects of strength training on muscle development in prepubescent, pubescent and postpubescent males. *Phys. Sportsmed.* 14 (9): 134-143, 1986.
126. **PINEAU J.-C.** Aptitudes physiques et morphologiques au cours de la puberté chez les jeunes filles scolaires. *Cahiers d'anthropométrie et biométrie humaine (Paris)*, VIII, n°1-2 : 115-133(1990).

127. **PINEAU J.-C.** Importance de la puberté sur les aptitudes physiques des garçons scolaires. *Bull. et Mém. de la Soc. D'anthrop. de Paris, n. s., t. 3, n°3-4 : 275-286, 1991.*
128. **PIRNAY F.** Etude physiologique du test de Léger et coll. *Science et Sports 7 : 93-99, 1992.*
129. **POORTMANS J., VLAEMICK M, COLLIN M. et DELMOTTE C.** Estimation indirecte de la puissance aérobie maximale d'une population bruxelloise masculine et féminine âgée de 6 à 23 ans. Comparaison avec une technique directe de la mesure de la consommation maximale d'oxygène. *J. Physiol. (Paris) 81 : 195-201, 1986.*
130. **RICART-AGUIRRE R.M., LEGER L. et MASSICOTTE D.** Problèmes théoriques et pratiques de la prédiction de la VO₂ max. *Science et Sports 5 : 143-153, 1990.*
131. **RIDDOCH C., BO ANDERSEN L., WEDDERKOPP N., HARRO M., KLASSON-HEGGEBO L., SARDINHA L.B., COOPER A.R. and EKELUND U.** Physical activity levels and patterns of 9- and 15-yr-old European children. *Med Sci Sports Exerc, 36(1): 86-92, 2004.*
132. **ROSTEIN A., DOTAN R., BAR-OR O. and TENENBAUM G.** Effect of training on anaerobic threshold, maximal aerobic power and anaerobic performance of preadolescent boys. *International Journal of Sports Medicine 7: 281-6, 1981.*
133. **ROWLAND T.W.** Development aspects of physiological function relating to aerobic exercise in children. *Sports Medicine, 10: 255-266, 1990.*
134. **ROWLAND T.W.** On body size and running and running economy. *Pediatr. Exerc. Sci. 4: 1-4, 1992.*
135. **ROWLAND T.W.** Does peak VO₂ reflect VO₂ max in children? Evidence from supramaximal testing. *Med. Sci. Sports Exerc. 25: 689-693, 1993.*
136. **RUTTENFRANZ J., ANDERSEN K.L., SELIGER V., ILMARINEN J., KLIMMER F. and coll.** Maximal aerobic power affected by maturation and body growth during childhood and adolescence. *Eur. J. Pediatr. 139 : 106-112, 1982.*
137. **SADY S.P. and KATCH V.L.** Relative endurance and physiological responses: a study of individual differences in prepubertal boys and adult men. *Res. Q. 52: 246-255, 1981.*

138. **SADY S.P., KATCH V.L., VILLANACCI J.F. and GILLIAN T.B.** Children-adult comparisons of oxygen uptake and heart rate kinetics during submaximum exercise. *Res. Q. 54: 55-59, 1983.*
139. **SADY S.P.** Cardiorespiratory exercise training in children. *Clin. Sports Med. 5: 493-514, 1986.*
140. **SARIS W.H.M.** Habitual physical activity in children: methodology and findings in health and disease. *Med. Sci. Sports Exerc. 18: 253-263, 1986.*
141. **SEMPE M., PEDRON G. et ROY-PERNOT M.P.** Auxologie : méthodes et séquences. *Ed. : Théraplix, Paris, 205 p., 1979.*
142. **SHEEHAN J.M., ROWLAND T.W. and BURKE E.J.** A comparison of four treadmill protocols for determination of maximum oxygen uptake in 10 to 12 year-old boys. *Int. J. Sports Med. 8: 31-34, 1987.*
143. **SHEPHARD R.J., ALLEN C., BENADE A.J.C., DAVIES C.T.M., Di PRAMPERO P.E., HEDMAN R., MANIMAN J.E., MYHRE K. and SIMMONS R.** The maximum oxygen intake. An international reference standard of cardiorespiratory fitness. *Bull. WHO 38: 757-764, 1968.*
144. **SHEPHARD R.J.** The prediction of athletic performance by laboratory and field tests – an overview. R.J. Shepphard and H. Lavallee (eds.). *Physicla Fitness Assessment – Principles, Practice and Application, Springfield, 12: Charles C. Thomas, pp. 113-141, 1978.*
145. **SPRYNAROVA S.** The influence of training on physical and functional growth before, during and after puberty. *Eur. J. Appl. Physiol. 56 : 719, 1987.*
146. **STEWART K.J. and GUTIN B.** Effects of physical training on cardiorespiratory fitness in children. *Research Quarterly 47: 110-20, 1976.*
147. **SUNNEGARDH J. and BRATTERBY L.E.** Maximal oxygen uptake, anthropometry and physical activity in a randomly selected sample of 8 and 13 year old children in Sweden. *Eur. J. Appl. Physiol. 56 : 266-672, 1987.*
148. **TANNER J.M.** Growth at adolescence (2nd) ed. *Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1962.*
149. **TANNER J.M.** Fetus into man. Physical growth from conception to maturity. *London: Open Books, 1978.*
150. **TAYLOR H.L., BUSKIRK E. and HENSCHER A.** Maximal oxygen uptake as an objective measure of cardiorespiratory performance. *J. Appl. Physiol. 8: 73-80, 1955.*
151. **THIEBAULD C. et SPRUMONT P.** L'enfant et le sport: introduction à un traité de médecine du sport chez l'enfant. *Eds DeBoeck Université, 462 p., 1998.*

- 152. THOMKINSON G.R., LEGER L.A., OLDS T.S. and CAZORLA G.** Secular trends in the performance of children and adolescents (1980-2000): an analysis of 55 studies of the 20m shuttle run in 11 countries. *Sports Medicine*, Vol 33, n°4: 285-300, 2003.
- 153. VACCARO P. and MAHON A.** Cardiorespiratory responses to endurance training in children. *Sports Med.* 4: 352-363, 1987.
- 154. VANDERVAEL F.** Biométrie humaine. Eds : Masson, 165 p., 1980.
- 155. VANDERWALLE H. et FRIEMEL F.** Tests d'évaluation de la puissance maximale des métabolismes aérobie et anaérobie. *Science et Sports* 4 : 265-279, 1989.
- 156. VAN PRAAGH E., FELLMANN N., BEDU M. FALGAIRETTE G. and COUDERT J.** Gender difference in the relationships of anaerobic power output to body composition in children. *Pediatr Exerc. Sci.* 2 : 336-48, 1990.
- 157. WEINEK J.** Biologie du sport. Ed.: Vigot, 783 p., 1992.
- 158. WEINEK J.** Biologie du sport. Ed.: Vigot, 783 p., 1998.
- 159. WELSMAN J. and ARMSTRONG N.** Daily physical activity and blood lactate indices of aerobic fitness in children. *Br. J. Sports Med.* 26: 228-232, 1992.
- 160. WELSMAN J., ARMSTRONG N. and KIRBY B.** Serum testosterone is not related to peak VO₂ and submaximal blood lactate responses in 12-16 year old males. *Pediatric Exercise Science*, 6: 120-127, 1994.
- 161. WILLIAMS J., ARMSTRONG N., WINTER E.M. and CRICHTON N.** Changes in peak oxygen uptake with age and sexual maturation in boys: physiological fact or statistical anomaly? J. Coudert and E. Van Praagh (eds). *Children and Exercise XVI. Paris: Masson: 35-37, 1992.*
- 162. WOYNAROWSKA B.** The validity of different estimations of maximal oxygen uptake in children 11-12 years of age. *Eur. J. Appl. Physiol.* 43 : 19-23, 1980.
-