

Université Reims Champagne-Ardenne  
UFR STAPS de Reims

Doctorat nouveau régime

Discipline Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives,  
Physiologie de l'effort

ROMEUR Jean-Pascal

APPROCHE ENERGETIQUE DU CYCLISTE  
DE COMPETITION  
EN FONCTION  
DE L'AGE ET DE LA SPECIALITE

**Thèse dirigée par Elisabeth Rosnet,**

**Soutenue le 24 juin 2005**

**Jury :**

**Elisabeth Rosnet, Professeur des Universités**

**Alain Lodini, Professeur des Universités**

**Joseph Lounana, Maître de Conférences**

**Philippe Joly, Maître de Conférences**

**Jean Médelli, Médecin physiologiste responsable de service d'évaluation (rapporteur)**

**Yuli Toshev, Professeur d'Université (rapporteur)**

## SOMMAIRE

<b>REMERCIEMENT</b> .....	5
Clin d'œil.....	9
<b>INTRODUCTION</b> .....	13
<b>APPROCHE THEORIQUE</b> .....	19
<b>1. Définition de l'énergie</b> .....	<b>20</b>
<b>2. La consommation d'oxygène</b> .....	<b>21</b>
2.1. Approche générale.....	21
2.2. Puissance maximale aérobie ou Puissance maximale tolérée ? .....	22
<b>3. La cinétique de la consommation d'oxygène</b> .....	<b>24</b>
<b>4. La notion de seuil</b> .....	<b>26</b>
<b>MATERIEL ET METHODE</b> .....	<b>36</b>
1. matériel.....	37
<b>1.1. Ergocycle</b> .....	<b>37</b>
<b>1.2. Equipement pour l'analyse des gaz</b> .....	<b>38</b>
1.2.1. Les équipements : .....	38
1.2.2. Le fonctionnement : .....	38
1.2.3. Le pneumotachographe : .....	38
1.2.4. Les capteurs : .....	39
1.2.5. Les analyseurs : .....	39
1.2.6. Circuit de prélèvement : .....	40
1.2.7. Calibration : .....	40
1.2.8. Technique de calcul : .....	40
<b>1.3. Contrôle de l'activité cardiaque</b> .....	<b>41</b>
<b>1.4. Contrôle de la lactatémie</b> .....	<b>41</b>
2. METHODES .....	43
<b>2.1. Population</b> .....	<b>43</b>
<b>2.2. Protocole</b> .....	<b>44</b>
<b>2.3. Analyses statistiques</b> .....	<b>46</b>
2.3.1 Statistiques descriptives : .....	46
2.3.2. Examen des distributions : .....	46
2.3.3. Statistiques analytiques : .....	46

2.3.4. Corrélations : .....	47
2.3.5. Modèles statistiques : .....	47
<b>RESULTATS</b> .....	49
<b>1. APPROCHE STATIQUE : ANALYSE DES CARACTERISTIQUES ANTHROPOMETRIQUES ET PHYSIOLOGIQUES</b> .....	51
<b>1.1 Analyse des données brutes</b> .....	51
1.1.1. Paramètres anthropométriques .....	51
1.1.2. Paramètres physiologiques maximaux .....	53
1.1.3. Paramètres physiologiques au seuil .....	60
1.1.4. « Gross Efficiency » .....	72
<b>1.2 Analyse des corrélations entre les paramètres étudiés</b> .....	73
<b>2. APPROCHE DYNAMIQUE : ANALYSE DE LA CINETIQUE DE LA CONSOMMATION D'OXYGENE</b> .....	76
<b>2.1. Analyse de la normalité de la distribution des valeurs de VO<sub>2</sub> avant et après le seuil</b> .....	76
<b>2.2. Cinétique de la consommation d'oxygène pour la population générale</b> .....	76
<b>2.3. Analyse de la cinétique en fonction des groupes</b> .....	80
2.3.1. En fonction de l'âge .....	80
2.3.2. En fonction de la spécialité .....	80
2.3.3. En fonction du niveau .....	80
2.3.4. En fonction de la période .....	80
<b>2.4. Analyse de covariance</b> .....	85
2.4.1. Effet niveau .....	85
2.4.1. Effet spécialité .....	86
<b>2.5. Analyse de prédiction</b> .....	87
2.5.1. Déterminant pour le niveau .....	87
2.5.2. Déterminant pour la spécialité .....	87
<b>2.6. Régression pas à pas</b> .....	90
<b>2.7. Régression multiple</b> .....	91
<b>2.8. Déterminant du type de réponse</b> .....	92
<b>DISCUSSION</b> .....	97
<b>1. ETUDE CRITIQUE DU PROTOCOLE</b> .....	98
<b>1.1. Nombre et nature des sujets</b> .....	99
<b>1.2. Ergocycles</b> .....	100
<b>1.3. Incréments</b> .....	102
<b>1.4. Cadence de pédalage</b> .....	103

<b>1.5. Chaîne d'analyse des gaz expirés.....</b>	<b>104</b>
2. ETUDE CRITIQUE DU CARACTERE MAXIMAL DES EPREUVES D'EFFORT .....	106
3. ETUDE CRITIQUE DES RESULTATS DE NOTRE ETUDE .....	107
<b>3.1. Approche statique .....</b>	<b>107</b>
3.1.1. <i>Existe-t-il des différences entre les paramètres physiologiques maximaux, en fonction des différents échantillons de l'étude ? .....</i>	107
3.1.2. <i>Existe-t-il des différences entre les paramètres physiologiques au seuil anaérobie, en fonction des différents échantillons de l'étude ? .....</i>	109
3.1.3. <i>Quels sont les paramètres de notre modèle qui pourraient suffire à caractériser l'épreuve d'effort ? .....</i>	110
<b>3.2. Approche dynamique.....</b>	<b>111</b>
3.2.1. <i>Etude critique des pentes de régression avant et après le seuil.....</i>	112
3.2.2. <i>Quel est l'intérêt de l'étude des pentes ? .....</i>	116
3.2.3. <i>Quel est l'intérêt de l'étude des intercepts ? .....</i>	117
<b>3.3. Est-il possible d'effectuer une modélisation ?.....</b>	<b>118</b>
3.3.1. <i>Recherche des facteurs de biais.....</i>	118
3.3.2. <i>Intérêt de la puissance et recherche d'équations de prédiction spécifique de la population cycliste .....</i>	119
3.3.3. <i>Quel est l'intérêt d'utiliser <math>\Delta</math>slope ? .....</i>	120
<b>CONCLUSION</b> .....	122
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	125

## **REMERCIEMENT**

A l'origine d'une thèse il y a une réflexion générale sur un système. Dans mon cas, c'est une réflexion sur le système humain, sur la notion de l'entraînement. Cette réflexion s'est articulée autour de thèmes aussi fournis que la cellule au cours d'exercice, l'implication nerveuse dans l'effort ou les adaptations énergétiques.

C'est autour de l'approche énergétique que mes recherches bibliographiques se sont organisées. Dans une approche très appliquée, ma réflexion s'est portée sur les caractéristiques d'une population particulière, celle des cyclistes. L'effort s'est porté sur l'étude des coureurs par le biais de tests empirique de terrain, puis de laboratoire. Enfin, la connaissance bibliographique de plus en plus fine m'a permis de déterminer des orientations de travail que j'ai choisie appliquées, parce que je ne considère pas la recherche sans application, plus encore dans le domaine du sport.

Et puis ces recherches donnent toutes une impression agréable de maîtriser un phénomène... Le pire c'est qu'elles apportent la même impression opposée de ne rien savoir et d'être constamment en quête de réponse. La problématique générale devient alors...en quête de quoi ; et c'est dans ces moments que l'on se rend compte de l'importance des autres.

Un autre, les autres qui sont tous ceux qui m'ont aidés par des mots simples, par des attentions, par des propos divers et variés ; tous je voulais leur présenter mes sincères remerciements. Ces personnes représentent une partie de ma thèse...

Sincèrement, et par galanterie aussi, c'est en premier une femme que je veux remercier : Elisabeth Rosnet, professeur d'université et responsable du laboratoire de psychologie appliquée (EA 2073). Sans elle je n'aurais jamais terminé cette thèse. En effet, quand les événements (restons courtois) m'ont entraîné vers un début d'abandon, elle m'a permis de repartir, m'a expliqué ce qu'était une thèse et m'a relancé.

Que lui dire de plus, sinon merci et que j'espère que nos nouvelles collaborations vont s'affiner encore.

Une autre personne que je veux remercier : Alain Lodini. Professeur en contrainte mécanique appliquée et responsable du LCAM (EA 3305). La pertinence de ses analyses et de son questionnement a permis de recadrer mes approches scientifiques et de progresser dans ma réflexion. J'espère que notre collaboration ne s'arrêtera pas à la thèse et que mon évolution professionnelle permettra de viser plus haut en matière de recherche scientifique, pourquoi pas ensemble.

En plus d'Alain Lodini, il me faut remercier Philippe Joly qui reste ma référence en physiologie. Longtemps mes recherches bibliographiques se sont vues floues et incomplètes. Mais de l'instant de notre collaboration à l'instant de la rédaction il n'a cessé de me prodiguer des conseils qui m'ont permis d'avancer bien plus que dans mes premières « heures ». Sans lui je pense que mon approche de l'écrit scientifique se serait contentée d'article en français et d'ouvrage bilan. Depuis ma bibliothèque ne cesse de s'agrandir... pas la place disponible chez moi...

Je continue ces remerciements autour de mes références en physiologie, et à ce chapitre c'est Joseph Lounana que je veux remercier. Son approche est impressionnante et enrichissante. Elle est constituée de remise en cause constante et de réflexions statistiques. Sans une telle approche, la qualité de mon travail s'en serré ressentie et l'aurai-je réalisé correctement ? Cette question, après ces corrections et ses avis, je ne me la pose plus autant. Merci à vous.

Mais l'approche méthodologique n'est pas l'apanage d'une seule personne. C'est aussi au Docteur Jean Medelli (laboratoire d'analyse médicale du CHU d'Amiens), que j'adresse un autre merci tout aussi chaleureux et sincère pour avoir accepté d'être mon rapporteur. Mon approche téléphonique semble vous avoir surpris, tend cette démarche n'était pas courante mais malgré cela vous avez accepté et je vous en suis reconnaissant. Plus que le simple rapport c'est toute votre démarche intellectuelle qui m'a impressionné et qui m'a donné envie de continuer à chercher, merci encore.

En plus du Dr Medelli, c'est mon autre rapporteur, sans qui la thèse n'est rien, que je veux remercier, il s'agit du Professeur Yuli Toshev (directeur de recherche à l'institut Bulgare des sciences). Merci à vous, votre avis scientifique et votre pertinence m'a apporté beaucoup, tout comme votre approche de la vie et de la recherche. Sans de telles réflexions au détour d'une discussion ou d'un café (ce qui va parfois de paire) je ne suis pas sûr que j'aurai pris autant de recul dans les moments difficiles. Merci à vous.

A ce monde qui compose mon jury, il faut associer d'autres personnes qui compose un entourage et qui permettent de tisser un ensemble solide permettant de progresser.

Mais bien sûr les remerciements sont coutumiers de chaque travail, pourtant ce n'est pas une étape obligatoire et rébarbative, puisque c'est finalement le seul moment où l'on peut marquer les noms de ceux qui nous aident. Ainsi, très en avant de l'approche scientifique, il est important de considérer (au sens premier du terme) Thierry Letellier directeur de l'UFR STAPS de Reims tout au long de mon périple. Merci à lui pour son aide, pour son avis, pour ses réflexions pertinentes et sa façon de faire comprendre que l'on appartient à une institution qui nous aidera jusqu'au bout.

On s'y attache d'ailleurs ... sûrement car l'institution comprend l'ensemble des personnes chargées des tâches administratives et que celles-ci lui donne un sens et c'est aussi pour cela que je veux les remercier. Toutes celles qui m'ont encouragé par un mot, un regard, une gentille phrase, je veux citer Paulette, Valérie, Sylvette, Sandra, Fatima, Ti-Ti, Mme la chef, Fred, Lou-Lou, Céline, Brigitte, Francis, Christine, Francis, Françoise, Bichon, Agnesse, et surtout Pierre et Marie... du CREPS, à la base de mon travail. J'en oublie sûrement qu'ils ou qu'elles m'excusent.

Incontournable pour mon accomplissement, ce sont mes employeurs que je veux remercier. En effet, si j'ai pu être employé dans le domaine de la préparation physique (ce que je fais toujours), c'est grâce à tous ceux qui m'ont fait confiance et avec qui j'ai beaucoup échangé. Merci au rugby, au tennis, au cyclisme, au volley, aux Arts du Cirque, au handball et au football. Si j'ai attribués les remerciements de façon impersonnelle aux sports, c'est surtout parce que dans toutes ces structures c'est une équipe qui travaille.

Seule aide à qui j'ai toujours pensé et qui m'a aidé : merci à ma famille qui participe plus ou moins activement à la réalisation de ma thèse. Merci à eux, et à tous ceux que j'oublie ou que je n'ai pas cité mais à qui je pense, dont toi.

## Clin d'œil

Une thèse est le résultat d'un long acharnement. Si je devais la comparer à ma spécialité, je dirais que c'est un peu comme un Tour de France que l'on aborde comme un néo-pro, avec l'objectif de finir avant tout. C'est un ensemble d'étape qu'il faut maîtriser, seul ou à plusieurs, soit pour rester au contact, soit pour tenter de s'échapper.

A l'image d'une telle épreuve, je comparerai le prologue à la maîtrise, les premières étapes de plaine (avant le chrono par équipe) au DEA, la suite à la thèse.

Pour le prologue tout c'est bien passé. Mon échauffement était correct, de bonnes sensations et un bon résultat final. C'est une satisfaction, mais le Tour est long et il faut vite choisir sa stratégie pour les prochaines étapes.

Le choix se fait sur des critères quelques peu extérieurs à la course et s'ils avèrent difficiles à suivre au début, au final ils m'offrent un maillot vert et des places d'honneur. Dès lors le premier chrono, par équipe, s'annonce sous les meilleurs auspices, d'autant que le leader semble fort. On n'est rarement leader pour rien...

Le chrono démarre et nos ambitions sont totales : rester au contact des meilleurs, et conserver le maillot vert jusqu'au bout. Le règlement est simple, le temps est comptabilisé sur le 5<sup>ème</sup> homme. Dès le début, crevaison du leader qui ne va jamais être dans le rythme ; et puis trop de différence entre les qualités de chacun. L'équipe n'est pas homogène, trop de néo-pro sans doute, comment à t'elle était construite ? Le bilan est maigre, le maillot vert est encore conservé mais nos classements ne sont pas en rapport avec les ambitions affichées.

Les étapes qui suivent devraient nous permettre de nous étalonner d'avantage. Mais le chrono par équipe n'a pas menti, nous ne sommes pas dans le coup. De plus, au vu de l'ambiance et des responsabilités de chacun, notre leader quitte une course sur laquelle il n'aura jamais pesé. Entre nous les relations sont bonnes, mais chacun vit pour lui, il ne faudra pas compter sur un

travail de groupe pour la suite. Et la suite immédiate, c'est l'épreuve de vérité : le contre-la-montre individuel, qui précède la première journée de repos.

Pour cette épreuve, le temps ne passe pas vite, l'étape est longue (elle y paraît), mais paradoxalement, le bilan est correct. Le maillot vert n'est plus chez nous mais seul un coureur est hors délai. La journée de repos va permettre de dresser un premier vrai bilan. L'absence de leader offre des opportunités, de la sérénité et chacun peut rester concentré sur sa course, sans gâcher de l'énergie ailleurs. De plus, l'équipe est jeune et il va falloir juste penser à se placer pour rester en course et pourquoi pas profiter d'un coup.

L'engagement dans la deuxième semaine est plus aisé même si les premières étapes de montagne se profilent et que l'expérience dans ce domaine (à ce niveau) est nulle. Il va falloir trouver des aides en course...

Ces aides arrivent tôt, mais les conseils ne servent pas à monter plus vite, par contre ils permettent de monter plus intelligemment. Ces étapes difficiles s'enchaînent les arrivées au sommet se font dans le gruppette, mais pas encore hors délais. Les conseils pris à gauche et à droite auprès des meilleurs coureurs portent en partie leur fruit. Cependant, le bilan est maigre, à titre personnel, mais dans l'équipe un coureur est parvenu à se glisser dans une échappée, et sur de telles étapes, cet exploit la place parmi les premiers du général ; une vraie bouffée d'oxygène.

Néanmoins, la journée de repos est la bienvenue. Nos forces en présence sont maigres, un coureur est devant et il faut l'aider, les autres sont à peu près dans le même état que moi, la suite va être longue, d'autant qu'un autre abandon est à déplorer. Quant aux conseils reçus, certains font faire des efforts inutiles (à contre courant de la course), d'autres réconfortent, d'autres ne font pas plaisir, arrivent tard mais permettent de terminer les étapes. Cependant, l'épreuve apparaît plus longue qu'initialement prévue, et les encouragements du directeur sportif m'aide à ne pas bâcher, malgré la fatigue...

Mais la dernière semaine réserve des surprises. Et dès la première étape, une échappée se dessine ; je suis dans le coup ; c'est fabuleux ; hier j'étais arrêté ; aujourd'hui je suis en train de jouer l'étape. Tout le monde roule dans l'échappée, je décide de marquer un coureur, mais j'ai mal estimé la course et le regard des autres. Tous savent que je vais vite et au panneau des cinq kilomètres une attaque à laquelle je ne répond pas... c'est pas à moi de rouler, je ne suis pas le plus fort, mais tout le monde pense pareil... dommage mais les points marqués à l'arrivée me replace au maillot vert et une place d'honneur c'est toujours bon à prendre. Les étapes suivantes sont des étapes de montagne, certes les dernières, mais pas les plus simple à gérer. Elles sont dures, longues et pour moi la montagne accouche d'une souris. Les moments étaient difficiles, l'intensité était élevée mais tout cela m'apprend juste à rester concentré et à ne pas abandonner même si « je ne vois rien venir ». Pour le reste de l'équipe les résultats sont meilleurs, les places sont là et un coureur reste dans les 10. Ces résultats m'encouragent. Et puis, lors de l'étape de transition nouvelle échappée, et première victoire d'étape. C'est un énorme soulagement c'est l'assurance de jours sereins même après le Tour, mais paradoxalement c'est aussi l'envi que ça se finisse, tant l'usure est présente.

La suite de la semaine se passe avec ses joies et ses peines, jusqu'au dernier chrono, jusqu'au bout de soi. L'énergie restante sera destinée à se remettre en question et à essayer de se concentrer sur la fin, juste pour finir pour voir l'avenir avec plus de sérénité et de satisfactions.

La fin arrive, ... usé mais satisfait, content même. Le bilan est bon, une étape et un maillot pendant quelques jours ; et puis le changement probable d'équipe, plus en lien avec mes capacités et mes ambitions. Enfin, les champ qui seront, quoi qu'il en soit, une victoire. La dernière nuit sur le Tour approche, il faut préparer la fin, même si cette étape est festive (au début) à l'arrivée il y a une ligne, un bouquet peut être, mais pas une chute. Ne pas penser à la chute, celui qui sait pédaler ne chute pas.

L'arrivée sur les Champ... c'est incroyable je suis avec tous les rescapés, les meilleurs et les autres, tout le monde est excité, les spectateurs sont là, j'ai gagné. Tous ces doutes, toutes ces tensions, je ne les ai pas affronter vraiment seul, entouré je l'ai été mais pour n'oublier personne (mais alors personne) et continuer à montrer qu'il est possible d'y arriver, je voulais transcrire mes impressions au travers d'un Tour imaginaire que j'ai terminé, non sans heurs...

Aussi, plus qu'un remerciement c'est une forme d'hommage que je rends à tous ceux que j'ai croisé : honnêtes, malhonnêtes, témoins, spectateurs, acteurs, conseillers, ... Riche des moments que j'ai vécu avec vous, je vous dédie ce travail. Mais, même si je ne veux pas faire de ce clin d'œil un remerciement nominatif, je citerai quand même mes parents, ..., alors, à ma mère et à mon père, car quand je ferme l'autre œil, c'est à vous que je pense...

# INTRODUCTION

Le cyclisme peut se décliner selon plusieurs spécialités olympiques (la route, la piste, le VTT, le BMX) et d'autres non olympiques (cyclo-cross, polo vélo, vélo artistique, vélo-ball). Toutes ces disciplines présentent des particularités liées au lieu (piste, route, sous-bois, ...), à la surface d'expression (bois, terre, bitume, ...), au matériel utilisé (BMX, vélo de piste, VTT, ...) ou au temps d'effort (de 10 secondes à plusieurs heures).

La variété de ces spécialités entraîne des différences qui s'observent sur les plans morphologique, tactique, technique, musculaire et/ou énergétique. Ainsi, la recherche de performance s'est organisée autour de ces thèmes, à partir des compétences des entraîneurs et des approches théoriques des chercheurs. Pourtant, ces deux professions sont régulièrement mises en opposition alors qu'elles restent très complémentaires. En effet, si l'entraîneur correspond à celui qui rencontre les problèmes du sportif au quotidien, le chercheur correspond au « modélisateur » qui s'appuie sur des connaissances théoriques afin de légitimer son raisonnement et de lui donner une cohérence vis-à-vis de l'application pratique.

Ainsi, depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle, les travaux de Margaria, Hill ou Astrand ont permis de mieux comprendre les phénomènes complexes comme le travail musculaire ou les adaptations cardio-respiratoires à l'effort. Pour les cyclistes, qui restent une population très étudiées, les travaux se sont orientés vers la détermination des facteurs tels que la puissance, la consommation d'oxygène ou la fréquence cardiaque afin d'établir un modèle de comparaison et de discrimination. Des modèles sont apparus et restent souvent utilisés en pratique (Astrand et Rodhal, 1954 ; Howley et coll., 1995 ; Loudon et coll., 1998).

Ce double paradoxe entre l'opposition chercheur / entraîneur et modèles théoriques / application pratique se caractérise par la mise en évidence des différences entre les valeurs de laboratoire et les valeurs de terrain (Iaiche et coll., 1996 ; Hawley et Stepto, 2001) et entraîne un préjugé vis-à-vis des tests de laboratoire.

Pourtant, ces tests représentent le seul moyen de déterminer précisément la consommation d'oxygène qui est le seul indice indirect et mesurable de la dépense énergétique du sujet. En effet, c'est à partir de l'étude de ce comburant (molécule permettant d'utiliser le carburant disponible entre les glucides, les lipides ou les protéides) qu'il est possible d'estimer le besoin pour un effort donné, et ainsi de connaître le potentiel énergétique d'un individu.

A partir de ces constatations, l'ensemble des entraîneurs a pris conscience de la nécessité de réaliser un test d'effort. Néanmoins, il s'agit de savoir quel est l'intérêt d'une telle évaluation ?

Le test d'effort réalisé sur ergocyclomètre permet de déterminer les valeurs maximales et les valeurs au seuil pour cette population cycliste dont la filière dominante pour la production d'ATP est la filière aérobie (Hawley et Stepto, 2001).

Les valeurs maximales, dont la consommation maximale d'oxygène ( $VO_2\text{max}$ ) que l'on considère comme un indice maximal de fonctionnement du système aérobie, permettent de définir la limite supérieure d'un sujet et d'orienter l'entraînement.

Le seuil reste une notion imprécise visant tout autant les sensations des sujets (Okura et Tanaka, 2001) que la modification nette de l'évolution de facteurs physiologiques. Suite aux travaux originels basés sur les paramètres respiratoires (Wasserman et Mc Iroy, 1964), cardiaques (Conconi et coll., 1982) ou physiologiques (Stegemann et Kindermann, 1982) les différents physiologistes ou entraîneurs continuent d'utiliser ces paramètres pour guider l'entraînement. C'est ainsi que Denadai et coll. (2004) utilisent l'état stable des lactates sanguins pour une charge constante et le seuil anaérobie situé à une lactatémie de  $3,5\text{mmol.l}^{-1}$ , pour déterminer leurs intensités. Pour Bourgeois et coll. (2004) c'est le point de déflexion cardiaque qui est utilisé (point où la pente cardiaque perd la linéarité observée à faible intensité). Hug et coll. (2004) utilisent l'électromyographie pour estimer l'intensité limite et

enfin (et la liste n'est pas exhaustive) Ogata et coll. (2004) utilisent le seuil ventilatoire, qu'ils situent au point de compensation respiratoire, c'est à dire au moment où l'augmentation de la ventilation devient abrupte.

Cependant, en dépit d'un temps d'exercice prolongé et donc d'une dominante de la filière aérobie, l'intensité de la compétition diffère selon le profil ou le rythme des autres compétiteurs (Lucia et coll., 2001a). La variabilité dans l'intensité entraîne diverses adaptations physiologiques (ventilation, consommation d'oxygène, lactatémie...) qui sont largement décrites (Amann et coll., 2004 ; Bourgeois et coll., 2004 ; Denadai et coll., 2004) mais ne permettent pas pour autant de caractériser de manière précise le niveau d'effort lors d'une compétition.

Ainsi, à partir des approches énergétiques représentées par la consommation d'oxygène, il s'agit de savoir en quoi les valeurs de la cinétique de la consommation d'oxygène, de la fréquence cardiaque, des puissances développées et de la lactatémie déterminées au cours d'un test d'effort peuvent être utiles à l'entraîneur afin d'organiser et de rationaliser l'entraînement des cyclistes.

D'après la littérature, les valeurs absolues maximales ou aux différents seuils varient en fonction de l'âge et du niveau de compétition (Astrand et Rodahl, 1994) alors qu'elles ne semblent pas différentes pour la spécialité (Hawley et Stepto, 2001) ni pour le moment où sont réalisés les tests au cours de la saison (Barbeau et coll., 1993).

Dans un article de synthèse (Zoladz et coll., 1995) concernant la cinétique de l'oxygène au cours de tests incrémentaux, il existe une dérive de celle-ci au-delà du seuil ventilatoire ou lactique. En revanche, pour Lucia et coll. (2002c) s'il existe bien une rupture dans la linéarité

$VO_2/P$  à partir du seuil, celle-ci se traduit par une diminution pouvant être expliquée par le niveau de compétition des sujets.

En ce qui concerne l'âge, il existe des différences qui apparaissent discriminantes (Cleuziou et coll., 2002 ; Ahmad et coll., 2001), tandis qu'à notre connaissance la spécialité et le moment de la saison ne semble pas avoir été étudiés.

Pour tenter de répondre à ces différentes questions nous avons entrepris une étude qui a porté sur 109 sujets, séparés en sous groupe afin d'étudier les facteurs pouvant être discriminants pour l'âge (15-17 ans, 18-22 ans, > 22 ans), la spécialité (route ou VTT), le niveau (régional ou national) et le moment de la saison où a été effectué le test (ON, OFF).

Pour ce faire, nous avons établi un protocole basé sur la réalisation de tests de laboratoire. Ces tests ont été réalisés sur un ergocyclomètre à frein électromagnétique, réglable en fonction des sujets (longueur et hauteur), disposant de pédales propres à chaque sujet, à partir d'une cadence de pédalage fixée à 90 rpm. La puissance développée était mesurée, ainsi que les paramètres ventilatoires et la lactatémie.

A partir des données recueillies nous avons exprimés nos résultats sous la forme statique par détermination des paramètres maximaux ( $VO_{2max}$ ,  $P_{max}$ ,  $FC_{max}$ ,  $La_{max}$ ) et au seuil arbitrairement fixé à une lactatémie de  $4 \text{ mmol.l}^{-1}$ .

Cette approche a été complétée d'une analyse dynamique de l'oxygène afin d'analyser la présence ou l'absence de linéarité  $VO_2/P$ .

Nous avons ensuite effectué une analyse statistique afin d'aboutir à une modélisation possible qui nous permettrait de caractériser notre population.

Dans ces résultats nous avons tenter d'apporter une réflexion basée sur l'étude de la littérature afin d'observer l'existence d'éléments concordants ou discordants avec les résultats de notre étude.

Nous avons ensuite tenté d'apporter une analyse critique sur le protocole effectué afin de tenir compte de tous les facteurs de biais possible qui pourraient expliquer les similitudes ou les différences observées avec la littérature.

Enfin, nous avons conclu ce travail en émettant des idées pouvant être exploitées pour une étude ultérieure qui pourrait être entreprise afin de compléter notre étude.

**APPROCHE**

**THEORIQUE**

Le cyclisme se caractérise par des temps d'effort longs sollicitant la filière aérobie que l'on peut caractériser par les notions de capacité et de puissance.

La puissance (ou  $VO_2\text{max}$ ) est considérée comme un très bon indicateur du niveau de la filière aérobie chez les coureurs à pied (Barbeau et coll., 1993). Par contre Hawley (2002) considère que la puissance ne discrimine pas suffisamment les cyclistes. En effet, leurs performances d'endurance ne seraient pas liées avec des hauts niveaux de consommation maximale d'oxygène ( $VO_2\text{max}$ ) (Bosquet et coll., 2002).

L'ambiguïté sur le rôle de ces deux notions (*i.e.* niveau maximal et niveau d'endurance) en cyclisme sous-entend des situations adaptatives différentes (Bosquet et coll., 2002). Chez le cycliste, l'endurance (pourcentage d'un maximum) reste la notion importante. Elle est déterminée à partir du seuil anaérobie (Bosquet et coll., 2002) qui peut être défini au cours d'un test à charge progressivement croissante (Swain et Wright, 1997). Cette ambiguïté nous amène à développer diverses notions théoriques liées à l'énergie, à la consommation d'oxygène et à la notion de seuil.

### **1. Définition de l'énergie**

L'énergie est présente sous six formes : nucléaire, lumineuse, électrique, mécanique, thermique et chimique. Des cinq premières présentées, on peut estimer que les énergies nucléaire et lumineuse ne sont pas adaptées à notre étude. Ensuite, l'énergie chimique correspond à la somme des énergies électrique (potentiel d'action), mécanique (contraction musculaire) et thermique (chaleur libérée). La mesure des énergies électrique et musculaire est difficile à estimer. L'énergie thermique est évaluable mais réclame un matériel complexe (salle isolante...). L'énergie chimique représente l'ensemble des réactions permettant l'action musculaire, donc la performance ; elle est plus aisément estimable.

L'approche énergétique d'une performance doit considérer plusieurs éléments fournisseurs d'énergie :

- les graisses et les sucres considérés comme les plus grand fournisseur d'énergie musculaire au cours de l'exercice (Rehrer, 2001),

- les protéines que l'on considère comme peu utiles pour des temps d'effort courts, alors qu'elles sont de plus en plus impliquées dans l'exercice prolongé (Medelli et coll., 2000)

Ces substrats apportent de l'énergie par le biais de leur dégradation sous forme oxydative, ce qui implique l'utilisation d'oxygène que l'on peut mesurer grâce au test d'effort. La consommation d'oxygène ( $VO_2$ ) est alors une mesure indirecte de la dépense d'énergie par l'organisme pour la réalisation d'une performance, selon les modes aérobie (Baron, 2001) ou anaérobie (Weber et Schneider, 2002). Il est à noter que ces deux modes interagissent et que le témoin de mode anaérobie (lactatémie) devient un indice du mode aérobie, pour la notion de seuil.

## **2. La consommation d'oxygène**

### 2.1. Approche générale

La consommation d'oxygène ( $VO_2$ ) est exprimée en  $l \cdot \text{min}^{-1}$  ou en rapport à la masse en  $ml \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .  $VO_{2\text{max}}$  représente la mesure indirecte de la quantité maximale d'énergie qu'un individu est capable de fournir par ce mode. Elle est improprement qualifiée de puissance maximale aérobie (PMA), et elle correspond au « niveau intense » d'exercice décrit par Perrey et Candau (2002). A ce niveau d'intensité il n'existe pas de stabilité métabolique (Perrey et Candau, 2002). La durée de maintien de cette intensité maximale serait de 4 à 11 minutes (Van Praagh et coll., 2001 ; Berthoin et coll., 2001 ; Billat et coll., 1995).

La PMA est considérée comme le meilleur indice du niveau aérobie (Barbeau et coll., 1993), et comme l'un des meilleurs indicateurs du potentiel d'endurance (Iaiche et coll., 1996). La consommation d'oxygène mesurée au niveau des gaz expirés est le reflet de la consommation d'oxygène au niveau musculaire (Perrey et Candau, 2002 ; Koga et coll., 2001 ; Whipp et Mahler, 1980).

VO<sub>2</sub>max est jugé stable au cours d'une courte période trois semaines de haute intensité pour des cyclistes de compétition et est supposée stable au cours d'une saison de compétition (Rietjens et coll., 2001). Pourtant d'autres auteurs montrent que l'état de forme est lié à la modification des facteurs tels que la consommation d'oxygène au cours de la saison (Faria et coll., 2005). Il existe des difficultés, dans la dénomination de VO<sub>2</sub>max. En effet, il s'agit de définir une notion de valeur la plus élevée (pic de VO<sub>2</sub>) ou la suite de valeurs maximales (plateau de VO<sub>2</sub>) (Howley et coll., 1995)

## 2.2. Puissance maximale aérobie ou Puissance maximale tolérée ?

Pour cette intensité, qui correspond, selon la littérature à la plus haute intensité aérobie, on observe une production de plus en plus importante de lactate, ce qui sous-entend une participation du système glycolytique anaérobie, afin de subvenir aux besoins en ATP du muscle (Faina et coll., 1995). Ceci rend impropre le terme de puissance maximale aérobie, d'autant qu'il existe un lien entre la capacité à éliminer les lactates et la possibilité à maintenir longtemps cette puissance maximale (Billat et coll., 1995 ; Messonnier et coll., 1997). Donc, il conviendrait mieux d'utiliser la notion de puissance maximale tolérée puisque plusieurs mécanismes entre en jeu dans le maintien de la puissance maximale :

- la vitesse d'ajustement de l'apport en O<sub>2</sub> ne constituerait pas un facteur limitant (Perrey et Candau, 2002),

- la participation lactique pourrait être liée à l'intervention des fibres de type 2, moins efficaces, ce qui justifierait l'augmentation de  $VO_2$  sans pour autant que l'on puisse considérer ce supplément comme de nature aérobie,

- l'accumulation intracellulaire de lactate est liée à une différence d'activité enzymatique de la lactate déshydrogénase (LDH) (Cazorla et coll., 2001), *via* le co-transporteur  $La-H^+$ , nommé « monocarboxylate transporter » (MCT) (Bangsbo et coll., 1997).

- l'activité de la LDH se réalise en amont des possibilités oxydatives de la mitochondrie et au niveau de l'activation des MCT (Cazorla et coll., 2001),

- les hautes intensités aérobies sont dépendantes de facteurs (ici les MCT) attribués plus communément à la filière anaérobie lactique.

Les MCT présentent différents isoformes (notés de 1 à 7) qui correspondent à différentes cinétiques (Juel et Pilegaard, 1998). Ils jouent un rôle central dans le métabolisme cellulaire et dans la communication métabolique entre les tissus (Fox et coll., 2000). Ils ne sont pas sensibles à une modification aiguë du pH (Dubouchaud et coll., 1999), ce qui leur permet d'être optimaux même dans des conditions d'acidose importante, c'est-à-dire celles rencontrées au cours d'un travail de nature anaérobie lactique ou proche de  $VO_{2max}$ . Chez l'homme, il est possible de considérer deux types de MCT pour l'efflux des lactates. Les MCT 4 qui sont les plus adaptés aux cellules ayant une activité glycolytique anaérobie, et les MCT1 qui sont les plus adaptés à une activité oxydative (Bonen et coll., 1998 ; Wilson et coll., 1998). Ces adaptations membranaires montrent plus encore la complexité des liens pour l'apport énergétique de type glycolytique (oxydatif ou non).

### **3. La cinétique de la consommation d'oxygène**

La cinétique de l'oxygène ( $\text{cinO}_2$ ) permet de caractériser l'adaptation de l' $\text{O}_2$  en fonction de la demande énergétique. Selon Perrey et Candaux (2002) et Scheuermann et coll. (2001), elle peut se décomposer en trois phases :

- une phase initiale rapide liée aux adaptations cardio-respiratoire en fonction de l'exercice,
- une deuxième élévation mono exponentielle située entre 15-20 secondes et 2-3 minutes,
- une troisième phase apparaissant après 3 minutes et correspondant à un état stable (Perrey et Candaux, 2002 ;).

La première phase (phase I) représente l'inertie du système d'ajustement de la consommation d'oxygène, c'est la phase cardio-dynamique (Carter et coll., 2000). Elle est présente au début de tout exercice alors que la quantité d'oxygène est insuffisante pour le muscle au moment de l'effort. Cette consommation d' $\text{O}_2$  initiale du muscle induit une chute mono exponentielle de la PhosphoCréatine (PCr). Or, l'efficacité correspond à la PCr produite par molécule d'oxygène consommée (Zoladz et 1998b).

La deuxième phase (phase II) est un ajustement lié au retard de l' $\text{O}_2$  (Delorey et coll., 2003 ; Grassi et coll., 2003 ; Bearden et Moffatt, 2001). Elle montre une  $\text{cinO}_2$  en lien avec l'âge. En effet, chez les sujets âgés (65 ans), la  $\text{cinO}_2$  (phase II) est plus lente pour des exercices d'intensité modérée (Scheuermann et coll., 2002) ; pour des exercices de moyenne intensité cette  $\text{cinO}_2$  est inférieure chez les sujets âgés par rapport aux sujets jeunes (25 ans). Cette  $\text{cinO}_2$  augmente entre le passage de moyenne à haute intensité uniquement pour les sujets

âgés. Ce résultat serait lié à une mauvaise perfusion musculaire (Scheuermann et coll., 2002). La  $\dot{V}O_2$  n'est cependant pas influencée par l'échauffement pour des exercices de moyenne intensité (Scheuermann et coll., 2002). Par contre, elle serait influencée par la position pour un exercice modéré ou intense. En position allongée, l'ajustement est plus lent au début de l'exercice (Koga et coll., 1999).

La phase III (stabilisation) présente une  $\dot{V}O_2$  moins rapide que celle de la phase I, au cours des efforts de moyenne intensité. L'augmentation de  $\dot{V}O_2$  est mono exponentielle (Carter et coll., 2000). C'est au cours de cette phase qu'apparaît la composante lente (CL). Comme la phase III est liée à l'intensité et à la durée de l'exercice, la dénomination de la phase stable peut prêter à confusion. En effet, c'est au cours de la phase III que l'organisme stabilise ses facteurs cardio-vasculaires, c'est aussi au cours de cette période qu'apparaissent des dérives décrites dans la littérature (CL,  $\text{incessO}_2$  ou  $\text{excessO}_2$ ). La CL n'existerait pratiquement pas à intensité faible ou modérée, elle serait liée à des intensités élevées. Cette dérive de la consommation d' $O_2$  (Zoladz et coll., 1998b) d'origine musculaire (Tordi et coll., 2003 ; Zoladz et coll., 1998a et c) a été généralement définie pour un effort à charge constante située aux alentours du seuil anaérobie. Elle correspond à la différence de consommation d'oxygène entre la troisième et la sixième minute d'un exercice à charge constante. Elle représente un décalage (surplus de consommation d'oxygène ou  $\text{excessO}_2$ ) entre la valeur théorique attendue et les données mesurées. Cette dénomination est attribuée à Whipp et Wassermann (1972) et est également reconnue sous le nom d' $\text{excessO}_2$ , définie par Jones et coll. (1999).

#### **4. La notion de seuil**

Depuis plusieurs années, les relations entre FC-P,  $VO_2$ -P et FC- $VO_2$  étaient considérées comme linéaires pour des exercices sous maximaux (Astrand et Rhyning, 1954 ; Wyndham et coll., 1959). Ceci a notamment amené les auteurs à extrapoler la FC en fonction de l'intensité obtenue, afin d'évaluer les valeurs maximales (Astrand et coll., 1964 ; Conconi et coll., 1982 ; Astrand et Rodahl, 1994).

La notion de rupture dans la linéarité de la relation consommation d'oxygène / puissance apparaît dès 1964, avec Wassermann et Mc Iroy qui introduisent la notion de seuil. Ceci conduit à une discussion sur la nature de cette notion de seuil ; plusieurs interprétations sont apparues à partir de différentes écoles, nord européenne, nord américaine et finalement sud européenne.

En effet, plusieurs seuils ont été définis et l'appellation même reste encore très discutée (Bosquet et coll., 2002), puisque l'on parle également de zone de transition (Rieu, 1987) et que l'on a décrit près de 19 méthodes de détermination (Peronnet, in Thys 2001). Finalement, les seuls points sur lesquels l'ensemble des auteurs s'accorde sont les suivants :

- l'évaluation subjective de cette intensité, que l'on considère comme difficile (Perrey et Candau, 2002),
- la réponse temporelle décalée entre  $VO_2$  et la lactatémie (Perey et Candau, 2002),
- l'accumulation des lactates limite la performance sur des temps variants de 30 secondes à 15 minutes, en fonction de l'intensité (Billat, 1996).

La lactatémie (concentration des ions lactate dans le sang) paraît être l'indice le plus utilisé pour la détermination du seuil. Cependant, plusieurs autres notions ont été proposées pour cette détermination :

- l'Onset of Blood Lactate Accumulation ou OBLA : dont la paternité est attribuée à Karlsson et coll. (1981). Ce seuil est établi à partir d'un exercice sur ergomètre, quand l'intensité atteint une lactatémie sanguine de 4 mM (Padilla et coll., 2000). Cependant, certains auteurs estiment que l'OBLA est le point qui délimite la rupture dans progression linéaire de la lactatémie au cours de l'effort (Washington, 1999). Ceci entraîne alors des valeurs différentes des 4 mM. Néanmoins, l'OBLA est une intensité qui permet de prédire les performances en endurance aérobie (Bentley et coll., 2001). Cet technique peut être considérée comme appartenant à l'école nord européenne.

- le seuil anaérobie (SA) ou anaerobic threshold : c'est un concept introduit par Wasserman et coll. entre 1964 et 1984 (Wassermann et Mc Iroy, 1964 ; Wassermann et coll., 1973 ; Wassermann 1984). Sa détermination se base sur la rupture de pente dans l'évolution de la lactatémie (Siciliano et coll., 1999). En effet, avant cette limite, la lactatémie est considérée comme stable et l'utilisation est au moins égale à la production (Ostera et coll., 2002). Son principe se base sur plusieurs étapes. Tout d'abord, il existe une hypoxie musculaire aux alentours des 50-70 % de  $VO_2max$ . Ensuite, on observe un apport d'oxygène inadéquat, perturbant la chaîne respiratoire et augmentant le taux de NADH mitochondrial. Cette augmentation inhibe la resynthèse des NADH et fait alors chuter le taux de NAD cytoplasmique. L'augmentation du rapport NADH/NAD ralentit l'utilisation du pyruvate entraînant une hausse de son taux dans le cytoplasme. Celui-ci devient alors accepteur d' $H^+$  et augmente ainsi la quantité d'acide lactique. Cette augmentation associée à une baisse d'ATP, de PCr (phosphocréatine) et à une augmentation d'ADP (adénosine diphosphate), de Pi (phosphate inorganique) et d'AMP (adénosine monophosphate) accentue la glycolyse et la production d'acide lactique. Enfin, cette production d'acide lactique augmentant, c'est la

lactatémie qui augmente (Gladden, 2001). Cette théorie basée sur l'hypoxie est correcte, dans le sens où la glycolyse anaérobie, la production d'acide lactique et son accumulation augmentent dans des conditions qui engendrent une limitation de la phosphorylation oxydative dans la mitochondrie. Néanmoins, elle est fautive si l'on considère que la production de lactate indique une hypoxie musculaire (Gladden, 2001).

Ce seuil anaérobie est synonyme au seuil d'acidose métabolique (Koike et coll., 1990) et, selon Wasserman et coll. (1994), aux alentours du seuil anaérobie, l'accélération de la glycolyse augmente l'acidité musculaire. Enfin, il est à noter que ce seuil reste inapproprié pour les enfants (Williams et coll., 1990 ; Tolfrey et Armstrong, 1995). Il représente enfin, selon Chicharro et coll. (1995) le début de l'augmentation de l'activité du système sympathique. Il apparaît pouvoir être mesuré par ce biais, et peut signifier qu'une limite nerveuse pourrait être à l'origine des adaptations. Ceci pourrait alors discuter les résultats obtenus par Lepers et coll. (2001) ou Lucia et coll. (2001 a,b) concernant l'économie nerveuse observée chez le cycliste à des cadences de 90 rpm.

Par contre, sa détermination semble complexe puisque les auteurs sont en désaccord sur la valeur à retenir. En effet, certains (Bisciotti et coll., 2003 ; Chicharro et coll., 1995) estiment encore que le seuil anaérobie correspond à une lactatémie de 4 mM, quand d'autres se basent sur la rupture de la pente de la lactatémie, comme préconisé par les auteurs originels. Dès lors se pose le problème de la terminologie, peut être liée à l'origine nord américaine de la détermination de ce point. Ce problème est d'autant plus complexe que Kindermann et coll. (1979) ont présenté le seuil anaérobie à 2 mM. Ce seuil correspond à celui de Wassermann et coll. (1973), excepté qu'ils ont proposés l'appellation de seuil aérobie (Medelli et coll., 1993).

- le Seuil Anaérobie Individuel ou SAI : il est établi en fonction de la fréquence de production des lactates musculaire et de l'équilibre avec leur fréquence de diffusion. Il représente des valeurs de lactatémie de 2 à 7 mmol (selon Stegemann et Kindermann, 1982). Selon Robergs et coll. (1990), cette méthode, qui utilise le sang artériel, se réfère au temps au cours duquel le lactate s'accumule et est éliminé. Ainsi, le SAI est déterminé en deux étapes. Tout d'abord on détermine le point où la lactatémie de récupération est égale à la lactatémie finale (d'un test exhaustif). Ensuite, à partir de ce point, on trace une tangente à la courbe d'évolution de la lactatémie. Cette méthode correspond aussi à une approche nord américaine.

Il existe une différence entre le SAI et le seuil lactique de l'ordre de 1,3 mmol. Ce seuil individuel se décline souvent sous une forme générale et est appelé seuil anaérobie. Il est alors largement accepté comme le point où l'on observe 4 mM de lactatémie (Ringwood, 1999) ; ce qui complique encore les terminologies.

- le Seuil Lactique (SL) ou lactate threshold : il est établi en fonction du point d'inflexion de la courbe de lactatémie en fonction du temps ; c'est à dire au moment où l'accumulation sanguine des lactates augmente brutalement, et que la droite de régression linéaire n'est plus respectée. Il représente des valeurs de lactatémie de 4 mM, et reste exprimé en fonction de  $VO_2\text{max}$  (selon Aunola et Rusko, 1984). Pourtant d'autres auteurs présentent ce seuil comme le point auquel la lactatémie est égale ou supérieure à 2 mM (Ocel et coll., 2003), c'est-à-dire le seuil aérobie de Kindermann et coll. (1979). Néanmoins, ces auteurs (i.e. Ocel et coll., 2003) proposent dans leur méthode, une détermination de ce seuil par le biais de la rupture de la droite de régression linéaire de la lactatémie. De même, d'autres auteurs utilisent la méthode « v-slope » avec la pente d'échange gazeux (Scheuermann et coll., 2001 ; Carter et coll., 2000).

Ce seuil lactique semble apparaître dans la littérature, sous le nom de seuil anaérobie (Beaver et coll., 1986). Sa paternité est alors attribuée à Wasserman et coll. (1973). Cependant, pour plusieurs auteurs, le seuil lactique (lactate threshold) est défini comme équivalent à une charge offrant une lactatémie de 2 mM, ce qui revient à nouveau au seuil de Kindermann et coll. (1979). Mais ce seuil de 2mM est considéré comme le seuil ventilatoire, selon Robergs et coll. (1990) qui le définit comme le seuil anaérobie individuel. Les différences de nomination viennent de la confusion initiale entre les études de Wassermann et coll. (1973) et de Kindermann et coll. (1979). Néanmoins, cette intensité présente une forte relation avec les capacités oxydatives du muscle et permet de prédire l'endurance (Bentley et coll., 2001). Il reste une base d'évaluation fiable (Hawley et Stepto, 2001), même si le pourcentage de  $VO_2$ max au seuil lactique reste flou,  $VO_2$  à ce niveau restant individuel (Takeshima et coll., 1996).

- le Seuil Ventilatoire (SV) ou ventilatory threshold : également nommé ventilatory anaerobic threshold (Scheuermann et coll., 2002 ; Hoogeveen, 2000 ; Washington, 1999), il représente le point où l'augmentation de la pente de  $VCO_2$  en fonction du temps est brutale et distincte de celle de  $VO_2$ . Cette rupture rompt l'évolution parallèle des deux débits (i.e.  $VCO_2$  et  $VO_2$ ). Cette détermination de la rupture s'appelle méthode « v-slope ». Elle est liée à l'existence de l'excès de  $CO_2$  pendant l'exercice dès l'approche de ce seuil (Beaver et coll., 1986). Pour Neary et coll. (1995) et Shimana et coll. (1991), ce point correspond à une évolution brutale de la fréquence ventilatoire à l'effort, et peuvent être utilisées pour définir un niveau transitionnel.

Il existe une deuxième méthode de détermination de ce seuil ventilatoire, par l'utilisation de la droite de régression linéaire du rapport  $VCO_2 / VO_2$  (nommé quotient respiratoire ou QR ;  $QR = VCO_2/VO_2$ ). La valeur est observée pour ce seuil est de l'ordre de

0,95 (Wasserman et coll., 1994). Ce seuil est en lien avec la participation lactique (Washington, 1999 ; Dickstein et coll., 1990) et ce point d'inflexion est utilisable pour évaluer la plus haute intensité soutenable (Chicharro et coll., 1997 ; Loftin et Warren, 1994), autant chez les adultes et les jeunes (Ahmaidi et coll., 1992). De plus, cette méthode est considérée comme extrêmement précise (Gaskill et coll., 2001). Ensuite, d'autres auteurs utilisent la perte de linéarité du rapport entre la ventilation et la consommation d'oxygène, tout en conservant la linéarité du rapport entre la ventilation et le rejet de CO<sub>2</sub> (Lucia et coll., 1999). Enfin, sans les nommer seuils ventilatoires, mais respectivement aérobie et anaérobie, certains auteurs (Medelli et coll., 1993) utilise les deux ruptures de la pente de la ventilation.

Au final, il semble que ce seuil corresponde au seuil anaérobie défini par Wasserman et Mc Iroy en 1964.

- le Seuil Cardiaque ou SC : défini premièrement par Conconi et coll. (1996), il correspond au point à partir duquel la pente cardiaque, jusqu'alors régulière (pente constante) en fonction du temps, présente une cassure, perdant ainsi sa régularité. Il est aussi appelé point de déflexion de la FC (PDFC) et correspond à l'OBLA (ou au 2<sup>ème</sup> seuil ventilatoire ou au point de compensation ventilatoire). Ce seuil présente « une absence de linéarité de la réponse cardiaque à l'exercice » Conconi et coll. (1996). Néanmoins, la FC, qui augmente régulièrement, a tendance à être plus basse à haute intensité (Lucia et coll., 2001b). Ce seuil de déflexion cardiaque est peu utilisé dans la littérature. On peut considérer qu'il s'agit d'une méthode propre à l'école sud européenne.

Il apparaît encore d'autres méthodes, moins reconnue présentée ci-dessous :

- le maximal steady state (MSS) : il est établi à partir d'une vitesse sur ergomètre, stabilisant  $VO_2$  et FC, et présente une lactatémie de 2,2 mM (Londeree et Ames, 1975) ;

- le maximal steady state of blood lactate level (MSSBLL) ou état maximal de stabilité de lactatémie : il est défini en fonction de la charge la plus haute produisant un état stable de production de lactate sanguin. Il représente des valeurs de lactatémie de 2,2 à 6,8 mM (selon Billat et coll., 1994) ;

Toutes ces méthodes sont corrélées avec le temps d'endurance, même s'il existe des différences dans les intensités détectées (Robergs et coll., 1990). Il s'agit de se demander si toutes ces techniques permettent de mesurer la même chose. La majorité de ces méthodes d'analyse utilise la notion de lactatémie pour refléter ces seuils d'intensité. Or, différentes études modulent ces résultats et leurs généralisations, ainsi :

- la valeur consensuelle de  $4 \text{ mmol.l}^{-1}$  de lactate sanguin, correspond à une intensité soutenable, différente, de celle de l'état stable d'accumulation des lactates (Beneke, 1995),

- la lactatémie peut être stable, au cours d'un exercice, avec des valeurs comprises entre 6 et 8 mmol (Cazorla et coll., 2001), ce qui ne permet pas de justifier une valeur à 4 mmol,

- la lactatémie atteint  $5 \text{ mmol.l}^{-1}$  pour des intensités de 60 à 85 % (Palmer et coll., 1999),

- il n'existe aucune augmentation nette (souvent même une baisse) de lactatémie au début d'un effort, à cause d'un gradient de concentration des lactates intramusculaires trop faible, d'un transporteur du lactate insuffisamment activé, d'une dilution de faible quantité du lactate produit dans le vaste espace extracellulaire (Freund et coll., 1989 ; Freund et Zouloumian, 1981). Dès lors, la lactatémie ne peut être utilisée comme indice fiable au début d'un exercice, ni même pour un travail au seuil,

- le seuil doit se déterminer sur des temps longs (Roecker et coll., 1998) ; or, les tests ne le déterminent que sur des temps courts (de 1 à 5 minutes), ce qui en fait une donnée hypothétique,

- la concentration lactique reflète la balance entre production et élimination des lactates, et résulte de l'oxydation par le cœur, le rein, le cerveau, le foie et le muscle squelettique (Di Prampero et Ferretti, 1999). Il est donc difficile d'observer, précisément, une participation anaérobie au travers des lactates sanguins,

- la part continue anaérobie n'est justifiable que si la lactatémie augmente tout au long de l'exercice. Quant au pic de lactate de la récupération, il n'est pas proportionnel à la production de lactate à l'exercice (Di Prampero et Ferretti, 1999). Ainsi, cet indice peut être considéré comme relativement fiable au cours d'un test d'effort à paliers longs mais en aucun cas au cours d'exercices d'intensité variable,

- la limite de la capacité maximale lactique est liée par la concentration maximale de  $H^+$ , avant l'inhibition de la glycolyse. Ceci dépend des caractéristiques musculaires, sanguines et du retraitement du lactate. Chaque lactatémie sanguine est liée à chaque individu, une

valeur moyenne ne peut alors, en aucun cas, prévaloir d'une intensité correcte pour un sujet pris au hasard (Di Prampero et Ferretti, 1999),

- il ne semble pas y avoir de lien entre limite cardio-vasculaire de nature aérobie et la limite d'accumulation des lactates (Coyle, 1995),

- les efforts entraînent une augmentation de la température, qui implique une augmentation de la glycolyse du muscle, de la glycolyse et de la dégradation des phosphates, ce qui peut contribuer à un changement dans les contributions anaérobie/ aérobie pour la resynthèse de l'ATP (Febbraio et coll., 1996).

Compte tenu des divers résultats, d'autres limites d'interprétation du seuil ont été discuté, à savoir que :

- le seuil lactique et l'excès de CO<sub>2</sub> ne montrent pas de lien (Anderson et Rhodes, 1991),

- le point de cassure de la ventilation, autrefois considéré comme indicateur du seuil lactique, est corrélé avec l'accumulation du potassium plus qu'avec l'accumulation des lactates (Spurway, 1992),

- la vitesse de course à pied au seuil ventilatoire est inférieure à celle au seuil anaérobie qui reste une mauvaise estimation de l'intensité de course (Jones et Doust, 1998),

- le seuil ventilatoire et le seuil anaérobie représente deux marqueurs d'intensité différente (Chicharro et coll., 1997 ; Boulay et coll., 1997 ; Loat et Rhodes, 1996).

De même, les études s'opposent puisque, pour Boulay et coll. (1997) et Loat et Rhodes (1996), le seuil ventilatoire est plus fiable pour déterminer une intensité d'exercice, tout au moins sur des temps d'effort longs, étant donnée la fluctuation de la lactatémie au cours de ces épreuves, alors que pour d'autres auteurs l'élimination des lactates (Francaux et coll., 1993) ou le seuil lactique sont de bons moyens de détermination de l'intensité d'exercice (Nichols et coll., 1997) car ils sont corrélés avec  $VO_2$  (Schuler et coll., 1998 ; Billat, 1996).

La notion de seuil est difficile à définir et à utiliser sur le terrain, puisqu'il existe des variations au niveau sanguin lors des prélèvements (variation de volume plasmique), puisque selon Lothian et Farrally (1995) les pratiques intermittentes nécessitent un développement des qualités de puissance aérobie ( $VO_{2max}$ ) et non d'endurance aérobie (seuil).

Il semble qu'en plus de la notion de seuil, la notion de consommation d'oxygène (à proprement parlé) devrait être importante pour caractériser une performance ou définir un entraînement.

Enfin, si la stabilité des paramètres cardiovasculaires est admise sous le seuil (Lucia et coll., 2002a ; Zoladz et coll., 1998a), quelle que soit sa forme de détermination (Palmer et coll., 1999), le seuil proposé reste plus souvent le seuil ventilatoire, défini par une augmentation de lactatémie de plus de 0,5 mM par rapport au niveau basal.

**MATERIEL ET**

**METHODE**

## 1. matériel

Pour réaliser les mesures, mais aussi pour les comparer entre elles, le matériel est le même. Il s'agit d'un ergocycle, d'un analyseur de gaz et d'un analyseur de lactate.

### 1.1. Ergocycle

L'ergocycle utilisé est de type Orion Pro Training 7016<sup>®</sup>. Il est composé d'un cadre de route, réglable en hauteur au niveau de la selle et du guidon.

La distance entre le guidon et la selle est aussi réglable par le déplacement d'un ou des deux éléments. Tous ces réglages sont effectués par le cycliste avant le test. Si besoin, ils sont affinés au cours de la période d'échauffement.

Les pédales utilisées appartiennent aux coureurs, afin de leur permettre de réaliser l'épreuve d'effort avec un mouvement de pédalage proche des conditions de terrain.

Le pédalage entraîne une roue pleine sur laquelle est appliqué un frein électromagnétique qui permet d'augmenter la force de freinage (mesurée en Newton).

La puissance (P, en watt) est analysée directement par le logiciel intégré à l'ergocycle. Ainsi, à partir de la vitesse et de la cadence imposées, le sujet choisit son braquet. La cadence est constamment réajustée autour de 90 rpm.

L'avantage de ce type d'ergomètre réside dans sa conception. En effet, il présente les caractéristiques d'un vélo de route normal (largeur de selle, type de cadre, ...). De plus, le cycliste apporte ses pédales et ses vêtements ce qui le rapproche de ses conditions habituelles de pratique.

## **1.2. Equipement pour l'analyse des gaz**

### **1.2.1. Les équipements :**

La consommation d'oxygène et le rejet de CO<sub>2</sub> sont analysés grâce au CPX/D System de MedGraphics®. Il est composé :

- d'un système d'acquisition et de capteur rapide de gaz (O<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub>),
- d'un pneumotachographe léger.

### **1.2.2. Le fonctionnement :**

L'air est collecté par l'intermédiaire d'un masque facial et passe dans le pneumotachographe où sont situés les capteurs de pression différentielle. Le pneumotachographe est relié au masque, lui-même relié au Medgraphics Cardiopulmonary Exercise System CPX/D®, afin d'analyser la consommation d'oxygène (VO<sub>2</sub>, en ml.min<sup>-1</sup>) et la production de dioxyde de carbone (VCO<sub>2</sub>, en ml.min<sup>-1</sup>). Le lag-time est de 0,42 secondes pour l' O<sub>2</sub> et de 0, 44 secondes pour le CO<sub>2</sub>. Le maximum d'oxygène passant pendant le retard peut entraîner une erreur de 12,1 % contre 6,95 % pour le CO<sub>2</sub>.

### **1.2.3. Le pneumotachographe :**

Le pneumotachographe PX/DX® comprend un dispositif d'interruption du débit aérien. Le module de débit comprend deux capteurs de pression afin d'observer la résolution aux bas débits, tout en permettant une mesure des débits importants. Le principe de mesure du MEDGRAPHICS® comporte la mesure de la pression contre une paroi, soit  $D^2 = k \times P$  (avec D : débit au carré, k : constante dépendante de l'équipement et de la densité des gaz, P : pression différentielle). Ce système n'est pas affecté par l'humidité et permet la mesure de

débit turbulent. Ce dispositif est constitué d'un tube au sein duquel se trouve une croix qui représente le lieu d'analyse de la pression et la mesure des débits. Les gammes de mesure vont de  $\pm 0,02$  à  $18 \text{ l.min}^{-1}$ , la résolution est de  $\pm 10 \text{ ml.sec}^{-1}$ , la précision est de  $\pm 50 \text{ ml}$  ou  $2\%$  de la mesure. Le diamètre est de  $35 \text{ mm}$ , la longueur de  $726 \text{ mm}$ , pour un poids de  $24 \text{ g}$ . L'espace mort est inférieur à  $40 \text{ ml}$  et la résistance est de  $0,84 \text{ mlH}_2\text{O.l.sec}^{-1}$  à  $12 \text{ l.sec}^{-1}$ . Le signal n'est pas affecté par la viscosité, la condensation ou la position du capteur. L'étude des échanges gazeux nécessite l'acquisition de trois grandeurs principales : le débit (ou le volume), les fractions de  $\text{CO}_2$  et les fractions d' $\text{O}_2$ .

#### 1.2.4. Les capteurs :

Les capteurs MEDGRAPHICS® sont des capteurs cinétiques. Ils permettent de mesurer la vitesse des gaz (et le débit avec la section est constante). On mesure la pression des gaz heurtant la paroi formée par un T. Cette pression est proportionnelle au carré de la vitesse. Pour ce type de matériel on obtient une mauvaise résolution pour les bas débits, d'où la mise en parallèle de deux capteurs, ce qui améliore la résolution aux bas débits. La linéarité obtenue est d'environ  $2\%$  dans la gamme de  $0$  à  $20 \text{ l.sec}^{-1}$ .

#### 1.2.5. Les analyseurs :

Il existe un analyseur de  $\text{CO}_2$  basé sur le principe de l'absorption du rayonnement infra rouge par ce gaz. La mesure est optique et dépend de la linéarisation initiale. Le temps de réponse dépend du système de prélèvement, de la taille et de la position de la chambre de mesure. Les temps de réponse de  $0$  à  $90\%$  vont de  $80$  à  $90 \text{ ms}$  pour le MEDGRAPHICS® à  $200\text{-}250 \text{ ms}$ . Sa gamme de mesure est de  $0$  à  $10\% \text{ CO}_2$ . La précision est de  $\pm 0,05\%$ , pour un temps de réponse de  $0$  à  $90\%$  inférieur à  $110 \text{ msec}$  et un temps de chauffe de  $30 \text{ min}$ .

L'analyseur d'O<sub>2</sub> est de type cellule de Zyrcone. Il utilise la mesure de la FEM (tension) entre un élément de zyrcone chauffé à 700° C situé dans le gaz à analyser et un élément analogue situé dans un gaz de référence. Il s'agit d'une mesure différentielle. Sa gamme de mesure est de 0 à 100 % O<sub>2</sub>. La précision est de ± 0,03 %, pour un temps de réponse de 0 à 90 % inférieur à 80 msec et un temps de chauffe de 30 min.

#### 1.2.6. Circuit de prélèvement :

Le circuit se base sur un capillaire séchant ou non séchant de diamètre inférieur ou égal à 0,7 mm et d'une longueur de 2,5 m. Le dispositif de régulation de vide permet de conserver une pression constante dans les analyseurs. Le débit de prélèvement est entre 60 et 80 ml.min<sup>-1</sup>. Il est fonction de la longueur du capillaire. Le prélèvement est effectué à la bouche.

#### 1.2.7. Calibration :

La calibration se réalise entre deux points pour chaque analyseur, par l'intermédiaire d'un gaz étalon MSR<sup>®</sup> (5% CO<sub>2</sub>, 12 % O<sub>2</sub>, BAL N<sub>2</sub>). Ce gaz étalon est présenté aux capteurs grâce à une seringue de 2 litres. L'embout du pneumotachographe, relié au masque est changé à chaque effort, puis désinfecté.

#### 1.2.8. Technique de calcul :

Il s'agit d'un système cycle par cycle. Le calcul de la consommation d'oxygène et du rejet de CO<sub>2</sub> se fait par intégration, des signaux O<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> en fonction du débit, en temps réel et sur un cycle respiratoire. Ce système analyse les FiO<sub>2</sub> et FiCO<sub>2</sub> et les valeurs de plateau. Ceci permet une mesure dans toutes les conditions de pression d'O<sub>2</sub>. Néanmoins, il existe une limite liée aux analyseurs dont le temps de réponse ne doit pas excéder 110 msec.

Pour le CPX / MEDGRAPHICS ® le calcul se fait grâce à une carte interface Wave Form Analyser Medgraphics® pilotée par un microordinateur. La fréquence d'échantillonnage est de 200 Hz. La liaison est de type RS232. Le moyennage est réalisé sur des périodes de 0 seconde à plusieurs minutes. 8 cycles respiratoires sont moyennés.

### **1.3. Contrôle de l'activité cardiaque**

Tout au long de l'effort, l'activité cardiaque est monitorée par un appareillage de type CASE™, G.E. Medical system®, avec enregistrement sur papier de chaque palier d'effort. La vision permanente, en temps réel, des 12 dérivations est assuré par télémétrie grâce au système SCOP LIVE 6 de CPX®. De plus, un cardiofréquencemètre de type polar® M31™ permet directement de mesurer les valeurs de FC à la fin de chaque palier et ainsi de proposer la valeur la plus juste pour chaque sujet. En cas de différence minime entre la mesure par télémétrie et la mesure du cardiofréquencemètre la moyenne des deux valeurs est utilisée. En cas d'écart trop important, induit par un parasitage de l'électrocardiogramme (décollage des électrodes, mauvaise conduction du signal, ...), le choix se porte sur la FC indiquée par le cardiofréquencemètre. Toute anomalie du signal électrique entraîne l'arrêt de l'effort. A chaque palier la pression artérielle (PA) est contrôlée par un appareil manuel de type COLSON®.

### **1.4. Contrôle de la lactatémie**

Les lactates (La, en  $\text{mmol.l}^{-1}$  ou mM) sont mesurées par l'intermédiaire d'un appareil de type Microzym SGI®, en utilisant la solution Cytochrome B2. La mesure s'effectue à partir d'un échantillon sanguin de 10  $\mu\text{l}$ , prélevé au lobule de l'oreille.

Avant chaque analyse l'appareil est étalonné par deux solutions témoins de lactate à des concentrations de 0,67 mmol et 13,3 mmol (laboratoire Espace Médical de Toulouse).

Précédant les prélèvements, le lobule de l'oreille est chauffé à l'aide d'une pommade révulsive à la capsicaïne (Hemade<sup>®</sup> Biolyon Oxoid<sup>™</sup>), afin de faciliter l'écoulement sanguin lors de la ponction à l'aide d'un microstylet.

## 2. METHODES

### **2.1. Population**

Notre population est composée de 109 sujets. Tous pratiquent le cyclisme au moins depuis quatre ans. Le niveau de pratique se situe entre la 250<sup>ème</sup> et la 3000<sup>ème</sup> place du classement français, classement établi à partir des résultats obtenus la saison précédente. Ces sujets sont habitués au protocole car ils ont déjà réalisé un ou plusieurs tests d'effort, dans les mêmes conditions, au même endroit et le même matériel expérimental. Tous ont été informés de l'expérimentation et de son but. A cet effet, ils ont signé un consentement éclairé leur signifiant les règles attenantes au protocole et les besoins de l'expérimentation. Les sujets sont libres de se retirer quant ils le souhaitent, leur identité n'est jamais divulguée.

Cette population est décrite selon quatre critères :

- âge : juniors (G15-17 ans), espoirs (G18-22 ans), seniors (G> 22 ans),
- spécialité : routier (ROU) et vététiste (VTT),
- niveau : national (NAT) et régional (REG),
- période de passation du test d'effort : hors saison de compétition (OFF) et en saison de compétition (ON).

## **2.2. Protocole**

Le protocole utilisé est un test incrémental, à cadence fixe et à charge progressivement croissante, par palier de trois minutes. Le sujet choisit son braquet afin de s'adapter à la vitesse proposée. Le test se réalise sur ergocycle depuis l'état de repos jusqu'à épuisement. Les conditions environnementales sont constantes au niveau de l'hygrométrie (60 % d'humidité relative) et de la température (20 à 21°C). Pour cela le local est régulièrement aéré et le nombre d'observateurs est limité à trois (le médecin, l'infirmière et le technicien). Ces personnes ont un rôle défini et encouragent le sujet, surtout sur la fin de son effort.

Le test d'effort est précédé d'une visite de contrôle qui comprend un examen anthropométrique (taille et poids), un examen clinique complet et un ECG de repos dont l'enregistrement est conservé sur papier selon les obligations faites aux équipes médicales. L'ensemble de ce protocole se réalise au laboratoire avec un matériel adapté aux cyclistes et à l'effort.

Les tests sont réalisés le matin ou l'après midi, au choix du sujet, en fonction des horaires d'ouverture du laboratoire (9h30-12h et 14h-18h). Ces tests sont réalisés de septembre à juin, en fonction du calendrier scolaire. L'ensemble du recueil des données est effectué sur trois années. Chaque sujet choisit le moment de la journée qu'il considère être le plus optimal pour lui. Cependant, aucun test de type Hornes et Osberg n'a été réalisé afin de déterminer si les sujets sont du matin ou du soir. A partir de leur prise de rendez vous, les sujets sont priés de s'abstenir de toute activité physique intensive dans les 48 heures précédentes. Un minimum de 2 heures est recommandé entre le dernier repas et le test. De même, les sujets sont priés de s'abstenir de toute prise médicamenteuse ou de substances stimulantes (tabac, alcool, café, ...). Les tests sont réalisés selon le même protocole quelque soit la spécialité ou la période. Par contre, il diffère en fonction de l'âge et du niveau de pratique.

Pour les sujets jeunes (15/17 ans), la vitesse initiale est plus basse que pour les sujets adultes (23 km.h<sup>-1</sup> vs 24 et 26). Pour les sujets adultes (plus de 18 ans) la vitesse est adaptée au niveau de pratique. L'épreuve d'effort est précédée d'un échauffement de 10 à 15 minutes. Trois protocoles sont utilisés en fonction des recommandations de la fédération française de cyclisme.

Le protocole 1 (P1) débute à une vitesse de 26 km.h<sup>-1</sup>, puis est augmentée, toutes les trois minutes, comme suit : 30 ; 34 ; 37 ; 39,5 ; 41,5 ; 43 ; 44,5 km.h<sup>-1</sup>.

Le protocole 2 (P2) débute à 24, puis 28, 32, 35, 38, 40, 41.5, 43 km.h<sup>-1</sup>.

Le protocole 3 (P3) débute à 23, puis, 27, 31, 34, 38, 39.5, 41 km.h<sup>-1</sup>.

A partir du dernier palier de chaque protocole (*i.e.* pour P1 : 44,5 km.h<sup>-1</sup> ; pour P2 : 43 km.h<sup>-1</sup> ; pour P3 : 41 km.h<sup>-1</sup>), la vitesse est augmentée de 1 km.h<sup>-1</sup> toutes les trois minutes. Le test est arrêté quand le sujet ne peut plus soutenir la cadence de pédalage pour une vitesse donnée. Son braquet étant stable, la puissance exprimée chute. Le dernier palier complet est le palier conservé. Les données recueillies pour les paramètres physiologiques sont celles enregistrées lors de la dernière minute de chaque palier, il s'agit de :

- la puissance, en watt (P, en W),
- la consommation d'oxygène en litre par minute (VO<sub>2</sub>, en l.min<sup>-1</sup>),
- le rejet de CO<sub>2</sub> en litre par minute (CO<sub>2</sub>, en l.min<sup>-1</sup>),
- la fréquence cardiaque en battement par minute (FC, en bpm),
- la lactatémie en millimole par litre (La, en mmol.l<sup>-1</sup> ou mM).

## **2.3. Analyses statistiques**

Les analyses statistiques sont présentées en fonction de la démarche de notre étude, à savoir, une description, une étude de la distribution, une comparaison des moyennes puis diverses régressions.

### **2.3.1 Statistiques descriptives :**

Les statistiques descriptives correspondent au calcul des moyennes, des écart-types et des corrélations. Elles sont réalisées grâce au logiciel StatView 5<sup>®</sup> (SAS, USA).

### **2.3.2. Examen des distributions :**

La normalité des distributions est testée en utilisant le test de Kolmogorov-Smirnov.

### **2.3.3. Statistiques analytiques :**

La comparaison de deux moyennes, pour les échantillons conformes à la loi normale, s'est effectuée à l'aide du test de Student pairé ou non pairé. Pour les échantillons non conformes à la loi normale on utilise le test de Wilcoxon pour des échantillons pairés et de Mann-Whitney pour les échantillons non pairés.

La comparaison de plus de deux moyennes pour les échantillons non conformes à la loi normale s'est effectuée à l'aide du test non paramétrique de Kruskal-Wallis, suivi du test post-hoc de Mann-Whitney (échantillons non pairés).

La comparaison de trois moyennes, pour les échantillons conformes à la loi normale, s'est effectuée à l'aide d'une analyse de variance (ANOVA) suivi du test post-hoc PLSD de Fisher.

### 2.3.4. Corrélations :

Les corrélations, pour les échantillons conformes à la loi normale, sont effectuées grâce au test de Pearson. Les corrélations, pour les échantillons non conformes à la loi normale, sont effectuées grâce au test de Spearman.

### 2.3.5. Modèles statistiques :

#### 2.3.5.1. Modèle de régression

Le modèle de régression linéaire simple à deux variables (1 variable indépendante et 1 variable dépendante) a été utilisé. Il a permis de déterminer une régression de type  $y = ax + b$ , et son  $R^2$ , avec :

y représentant la puissance,

x représentant la consommation d'oxygène,

a représentant la pente de la cinétique de la consommation de l'O<sub>2</sub> (cinO<sub>2</sub>),

b représentant l'intercept,

$R^2$  représentant le coefficient de détermination.

Le modèle de régression pas à pas à deux variables est utilisé. Il permet de rechercher les variables les plus pertinentes.

Le modèle de régression multiple à plus de deux variables est enfin utilisé parmi les modèles de régression linéaires. Il permet d'obtenir le niveau de contribution respectif de chaque variable indépendante vis-à-vis de la variable dépendante. Les coefficients observés permettant d'élaborer des équations de prédiction.

### 2.3.5.2. Modèle d'analyse de covariance

Ce modèle est nommé ANCOVA, il présente une variable dépendante (Y) une variable indépendante qualitative (X) et une variable indépendante quantitative (covariante). Pour notre étude, deux analyses sont réalisées l'une pour l'effet du niveau et de la spécialité (les « intercepts avant » et les « pentes avant » étaient discriminants du niveau et la « pente après » de la spécialité).

La signification des tests d'analyse est fixée à  $p < 0,05$ .

# RESULTATS

Nos résultats se présentent sous deux aspects. Une approche, que l'on peut nommer « statique », concernant les valeurs des paramètres physiologiques enregistrés au cours d'un test d'effort et une approche que l'on peut nommer « dynamique » concernant l'évolution de la cinétique de la consommation d'oxygène.

Ces deux approches sont appliquées aux différents échantillons discriminés :

- l'échantillon global,
- les échantillons relatifs à l'âge (G15-17, G18-22, G> 22),
- les échantillons relatifs à la spécialité (route ou VTT),
- les échantillons relatifs au niveau (national ou régional)
- les échantillons relatifs à la période où a été réalisé le test (ON : période de compétition ; OFF : période hors compétition).

L'approche statique est représentée par l'analyse des paramètres fixes (fréquence cardiaque, consommation d'oxygène, rejet de CO<sub>2</sub>, puissance et lactatémie) enregistrés au maximum de l'effort et au seuil arbitrairement choisi pour une lactatémie de 4 mmol.l<sup>-1</sup>.

L'approche dynamique correspond à l'analyse de la cinétique de la consommation d'oxygène enregistrée au cours de la dernière minute de chaque palier d'effort avec calcul des droites de régression, des pentes et des intercepts correspondants.

# 1. APPROCHE STATIQUE : ANALYSE DES CARACTERISTIQUES ANTHROPOMETRIQUES ET PHYSIOLOGIQUES

Dans ce chapitre, l'analyse concernera les données brutes puis les corrélations entre les paramètres étudiés.

## ***1.1 Analyse des données brutes***

Ces données sont réparties entre les paramètres anthropométriques, physiologiques maximaux, physiologiques au seuil et le gross efficiency (GE).

### **1.1.1. Paramètres anthropométriques**

Les résultats sont présentés dans les tableaux 1 à 5.

#### **1.1.1.1. Population générale**

Les données sont présentées dans le tableau 1.

#### **1.1.1.2. En fonction de l'âge**

Les données sont présentées dans le tableau 2. On observe une différence significative entre les trois âges choisis. Le G15-17 est significativement plus léger ( $p < .001$ ) que le G> 22 ( $63,6 \pm 9,5$  vs  $69,4 \pm 7,3$  kg).

#### **1.1.1.3 en fonction de la spécialité**

Les données sont présentées dans le tableau 3. Les VTT sont significativement ( $p < .001$ ) plus âgés ( $25,1 \pm 3,7$  vs  $20,4 \pm 4,5$  ans). Aucune différence n'apparaît.

**1.1.1.4 en fonction du niveau**

Les données sont présentées dans le tableau 4. Il existe une différence significative ( $p < .001$ ) de taille entre les Nationaux et les Régionaux, respectivement  $179,6 \pm 4,6$  et  $176,3 \pm 7,2$  cm.

**1.1.1.5 en fonction de la période**

Les données sont présentées dans le tableau 5. Il n'existe aucune différence entre le groupe ON et le groupe OFF.

Tableau 1. Paramètres anthropométriques pour la population générale (n=109).

<b>Paramètres</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Ecart-type</b>
Age (an)	21,0	4,7
Poids (kg)	67,0	8,3
Taille (cm)	177,7	6,5

Tableau 2. Paramètres anthropométriques en fonction de l'âge.

Paramètres	Echantillon			Test
	G15-17	G18-22	G> 22	ANOVA
n	33	33	43	
Age (an)	16,0 ± 0,8* §	19,4 ± 1,4 §	26,5 ± 1,9	p<.001
Poids (kg)	63,6 ± 9,5*	67,3 ± 7,2	69,4 ± 7,3	p<.001
Taille (cm)	176,1 ± 8,2	178,7 ± 5,0	178,1 ± 5,8	ns

n : nombre de sujets ; ± : écart-type ; \* : différence significative (p< .001) entre le G15-17 et le G>22 ; § : différence significative (p< .001) entre le G15-17 et le G18-22 ; § : différence significative (p< .001) entre le G18-22 et le G>22 : ns : non significative.

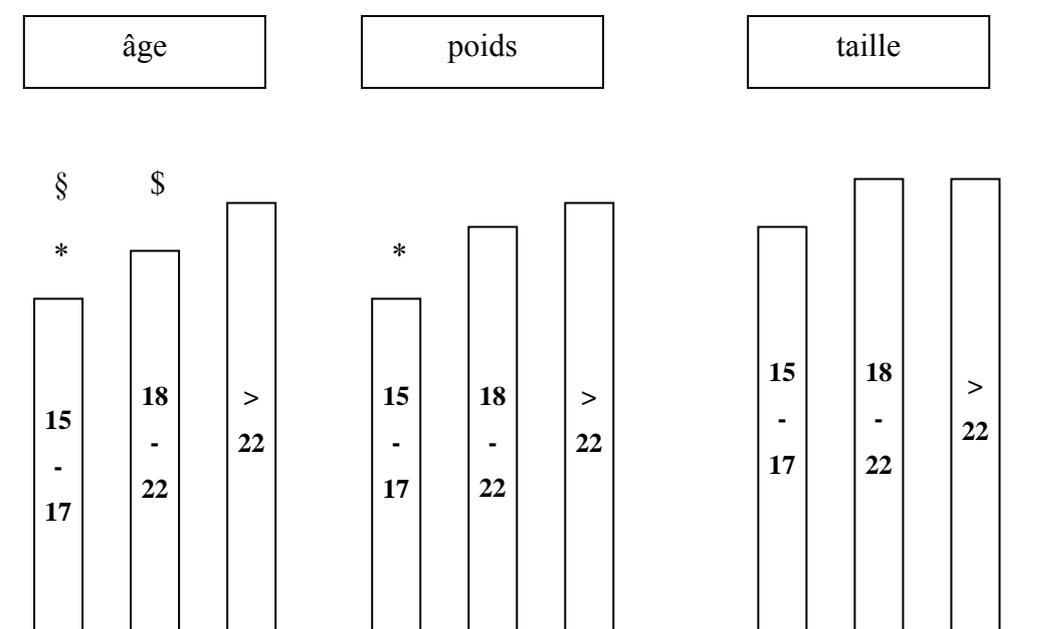


Figure 1. Représentation synthétique, non à l'échelle, des paramètres anthropométriques en fonction des âges.

Tableau 3. Paramètres anthropométriques en fonction de la spécialité.

Paramètres	Echantillon		Test
	Route	VTT	Student
n	95	14	
Age (an)	20,4 ± 4,5	25,1 ± 3,7	p<.001
Poids (kg)	66,8 ± 8,4	68,6 ± 7,1	ns
Taille (cm)	177,5 ± 6,8	178,6 ± 3,6	ns

n : nombre de sujet ; ± : écart-type ; ns : non significatif.

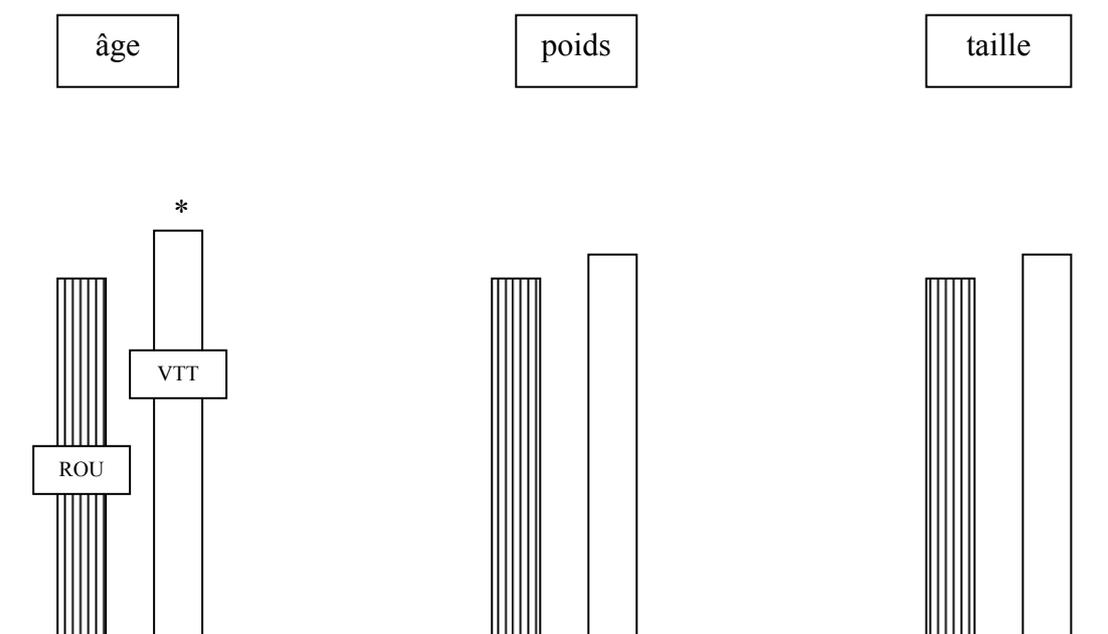


Figure 2. Représentation synthétique, non à l'échelle, des paramètres anthropométriques en fonction de la spécialité.

(\* : différence significative,  $p < .001$ )

Tableau 4. Paramètres anthropométriques en fonction du niveau.

Paramètres	Echantillon		Test
	National	Régional	Student
n	44	65	
Age (an)	23,2 ± 4,1	19,6 ± 4,5	p<.001
Poids (kg)	68,2 ± 5,2	66,2 ± 9,8	ns
Taille (cm)	179,6 ± 4,6	176,3 ± 7,2	p<.001

n : nombre de sujets ; ± : écart-type ; ns : non significatif.

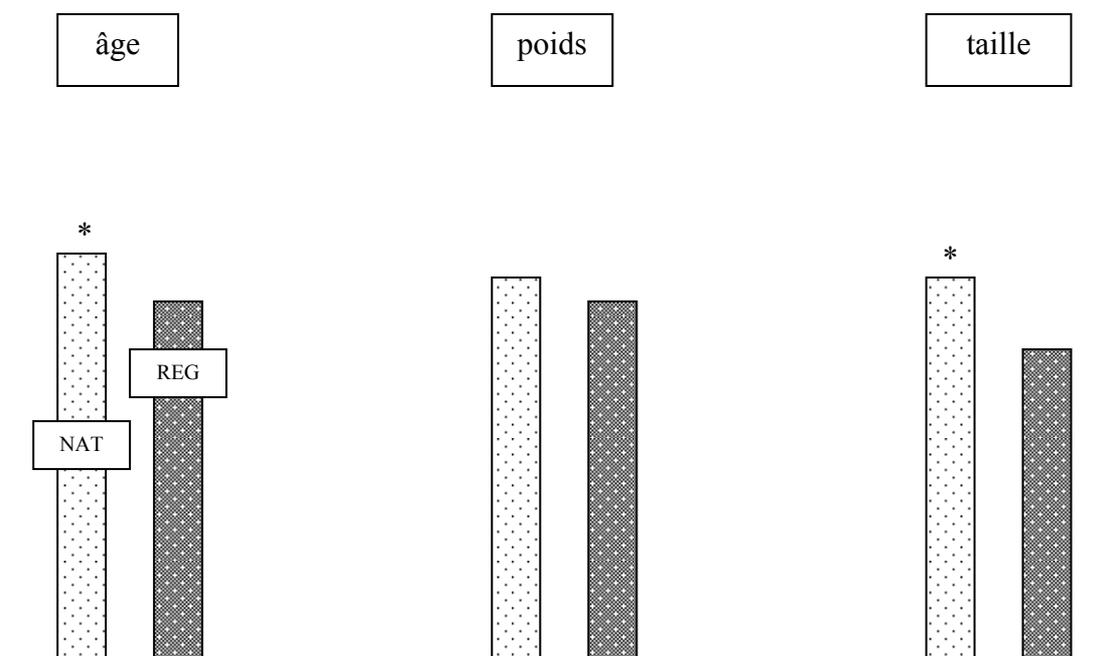


Figure 3. Représentation synthétique, non à l'échelle, des paramètres anthropométriques en fonction du niveau.

(\* : différence significative, p< .001)

Tableau 5. Paramètres anthropométriques en fonction de la période.

Paramètres	Echantillon		Test
	ON	OFF	Student
n	33	76	
Age (an)	20,5 ± 4,4	21,3 ± 4,8	ns
Poids (kg)	67,1 ± 6,5	66,9 ± 9,0	ns
Taille (cm)	178,1 ± 5,8	177,5 ± 6,8	ns

n : nombre de sujets ; ± : écart-type ; ns : non significatif.

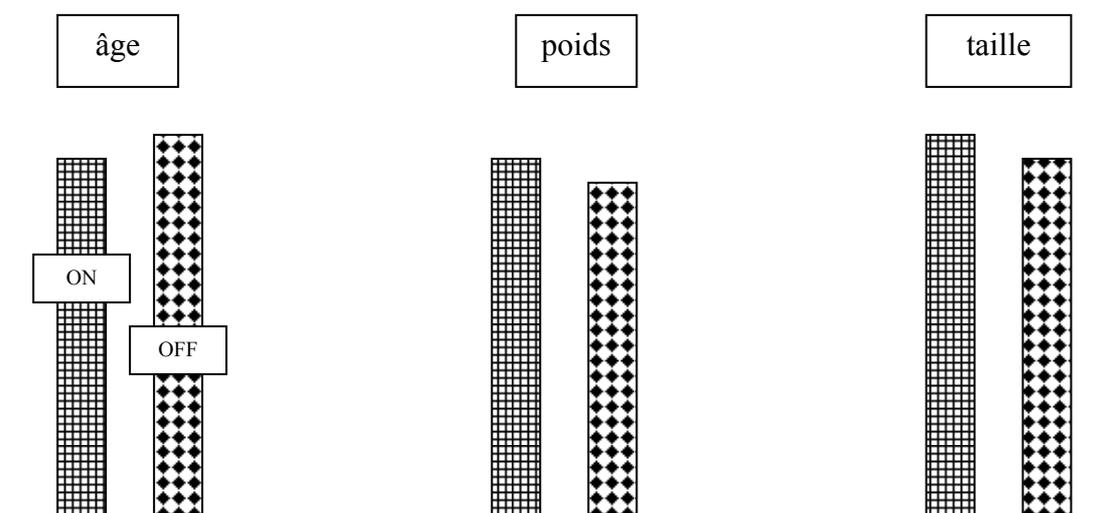


Figure 4. Représentation synthétique, non à l'échelle, des paramètres anthropométriques en fonction de la période.

### 1.1.2. Paramètres physiologiques maximaux

Les résultats sont présentés dans les tableaux 6 à 10.

#### **1.1.2.1 population générale**

Les valeurs de maximales sont présentées dans le tableau 6.

#### **1.1.2.2 en fonction de l'âge**

Les données sont présentées dans le tableau 7. Le groupe G15-17 est différents significativement ( $p < .001$ ) pour les paramètres  $P_{max}$ ,  $VO_{2max}$ ,  $VCO_{2max}$  et  $L_{max}$ . Par contre, la  $FC_{max}$  n'est pas différente entre les trois groupes.

Le G>22 présente une lactatémie inférieures aux deux autres groupes.

#### **1.1.2.3 en fonction de la spécialité**

Le tableau 8 présente les différences entre les Routiers et les VTT. Seule la puissance diffère significativement ( $p < .001$ ) avec une valeur supérieure pour les VTT ( $354,4 \pm 49,7$  vs  $390,4 \pm 28,2$  W).

#### **1.1.2.4 en fonction du niveau**

Le tableau 9 présente les échantillons Nationaux et Régionaux. Les Nationaux présentent des valeurs plus élevées ( $p < .001$ ) de P ( $391,1 \pm 37,5$  vs  $337,4 \pm 43,7$  W),  $VO_2$  ( $4,8 \pm 0,5$  vs  $4,0 \pm 0,5$  l.min<sup>-1</sup>) et  $VCO_2$  ( $4,8 \pm 0,5$  vs  $4,4 \pm 0,7$  l.min<sup>-1</sup>). Par contre, la FC ( $189,6 \pm 8,2$  vs  $193,7 \pm 8,9$  bpm) et les La ( $7,7 \pm 2,1$  vs  $10,8 \pm 2,3$  mmol.l<sup>-1</sup>) sont supérieurs ( $p < .001$ ) pour les Régionaux.

#### **1.1.2.5 en fonction de la période**

Le tableau 10 présente les différences entre les paramètres en fonction des périodes.  $VO_2$  est significativement supérieur ( $p < .001$ ) chez les ON par rapport aux OFF ( $4,4 \pm 0,5$  vs  $4,1 \pm 0,5$  l.min<sup>-1</sup>).

Tableau 6. Paramètres physiologiques maximaux pour la population générale.

<b>Paramètres</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Ecart-type</b>
Puissance (watt)	359,1	48,9
VCO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	4,6	0,6
VO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	4,2	0,5
R (VCO <sub>2</sub> /VO <sub>2</sub> )	1,09	0,1
FC (bpm)	192,1	8,8
La (mmol.l <sup>-1</sup> )	9,8	2,5

Tableau 7. Paramètres physiologiques maximaux en fonction de l'âge.

paramètres	Echantillon			Test
	G15-17	G18-22	G> 22	ANOVA
Puissance (watt)	320,7 ± 42,3*	365,9 ± 41,8	383,2 ± 40,7	p<.001
VCO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	4,2 ± 0,7*	4,7 ± 0,5	4,7 ± 0,5	p<.001
VO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	3,9 ± 0,5*	4,4 ± 0,5	4,4 ± 0,4	p<.001
FC (bpm)	195,0 ± 7,5	190,5 ± 10,7	191,0 ± 7,8	ns
La (mmol.l <sup>-1</sup> )	10,7 ± 2,7	9,8 ± 2,6	8,5 ± 2,5 <sup>§</sup>	p<.001

± : écart-type ; \* : différence significative (p< .001) entre 15-17 et les deux autres groupes ; § différence significative (p< .001) entre G> 22 et les deux autres groupes ; ns : non significative.

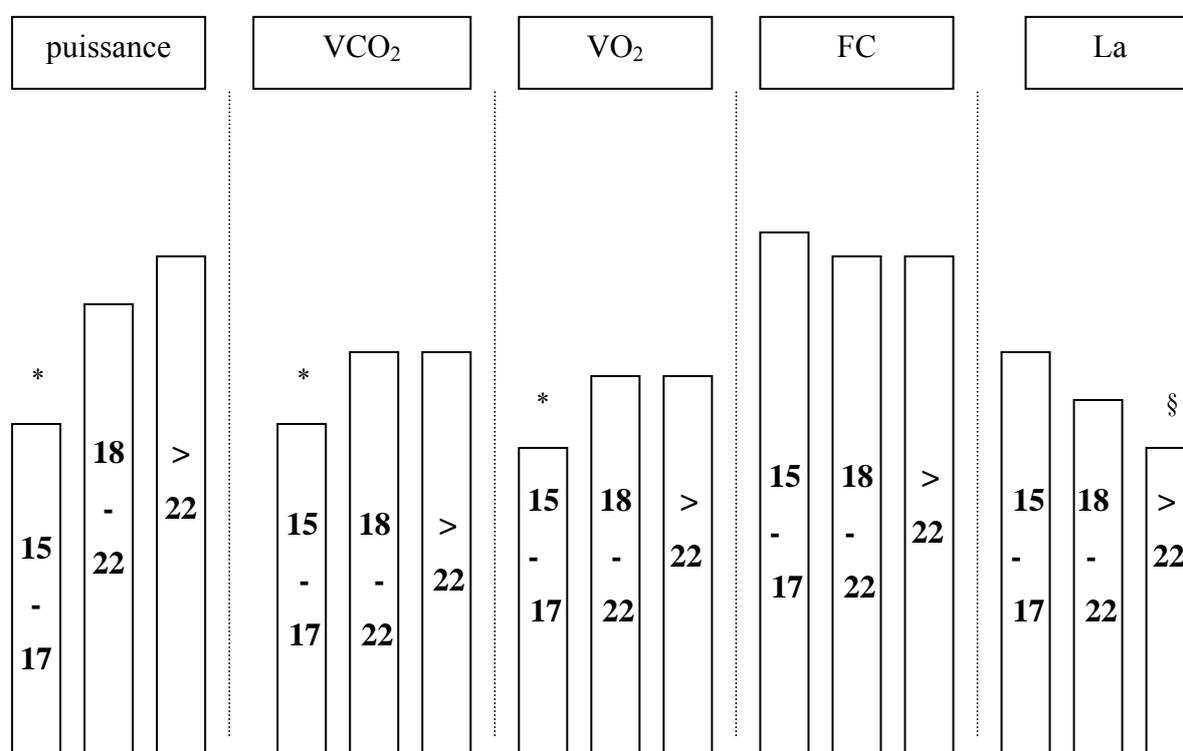


Figure 5. Représentation synthétique, non à l'échelle, des paramètres physiologiques maximaux en fonction de l'âge.

Tableau 8. Paramètres physiologiques maximaux en fonction de la spécialité.

Paramètres	Echantillon		Test
	Route	VTT	Student
Puissance (watt)	354,4 ± 49,7	390,4 ± 28,2	p<.001
VCO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	4,5 ± 0,6	4,8 ± 0,4	ns
VO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	4,2 ± 0,5	4,4 ± 0,4	ns
FC (bpm)	192,2 ± 9,2	191,0 ± 5,4	ns
La (mmol.l <sup>-1</sup> )	9,7 ± 2,7	8,9 ± 2,7	ns

± : écart-type ; ns : non significatif.

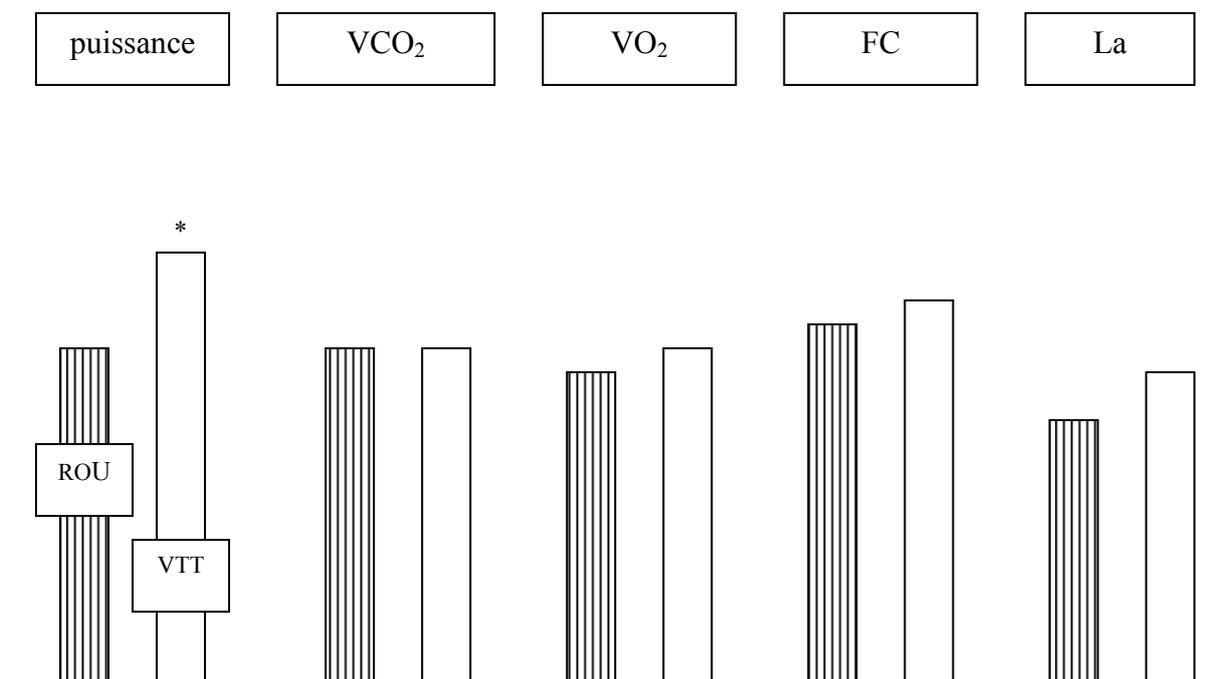


Figure 6. Représentation synthétique, non à l'échelle, des paramètres physiologiques maximaux en fonction de la spécialité.

(\* : différence significative, p< .001).

Tableau 9. Paramètres physiologiques maximaux en fonction du niveau.

Paramètres	Echantillon		Test
	National	Régional	Student
Puissance (watt)	391,1 ± 37,5	337,4 ± 43,7	p<.001
VCO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	4,8 ± 0,5	4,4 ± 0,7	p<.001
VO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	4,5 ± 0,4	4,0 ± 0,5	p<.001
FC (bpm)	189,6 ± 8,2	193,7 ± 8,9	p<.001
La (mmol.l <sup>-1</sup> )	7,7 ± 2,1	10,8 ± 2,3	p<.001

stat : test statistique ; ± : écart-type.

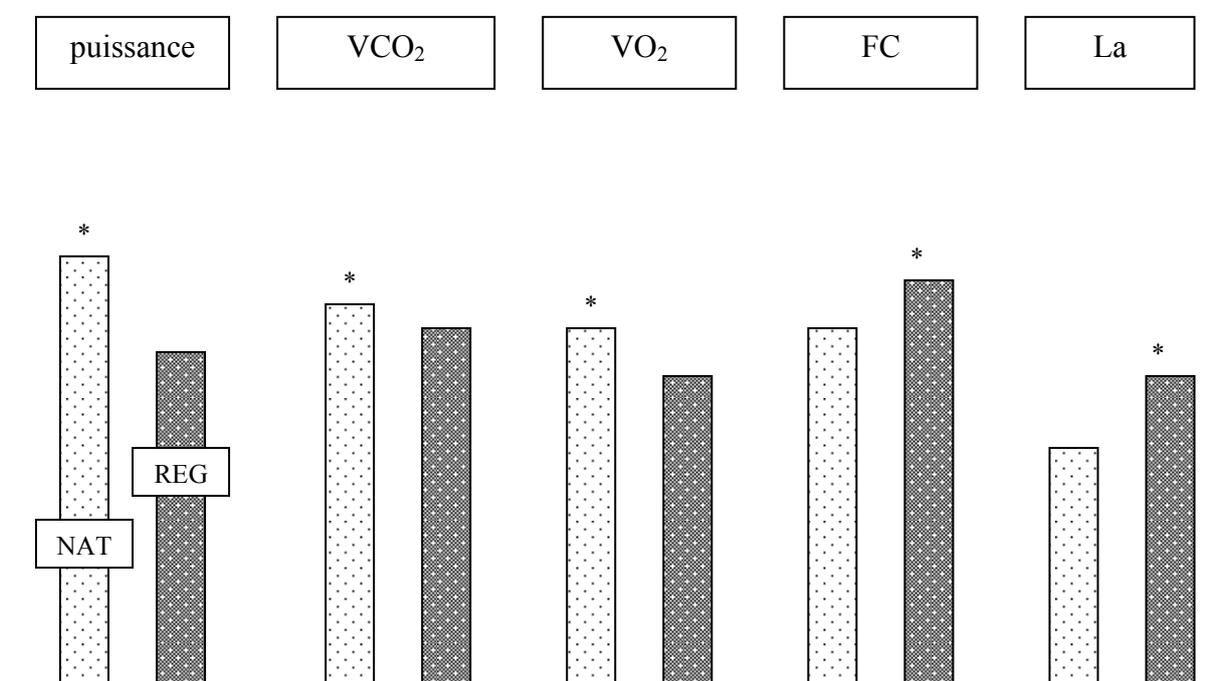


Figure 7. Représentation synthétique, non à l'échelle, des paramètres physiologiques maximaux en fonction du niveau.

(\* : différence significative, p< .001)

Tableau 10. Paramètres physiologiques maximaux en fonction de la période.

Paramètres	Echantillon		Test
	ON	OFF	Student
Puissance (watt)	368,0 ± 38,3	355,2 ± 52,6	ns
VCO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	4,7 ± 0,6	4,5 ± 0,6	ns
VO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	4,4 ± 0,5	4,1 ± 0,5	p<.001
FC (bpm)	191,0 ± 8,4	192,6 ± 9,0	ns
La (mmol.l <sup>-1</sup> )	9,4 ± 2,0	9,6 ± 3,0	ns

± : écart-type ; ns : non significatif.

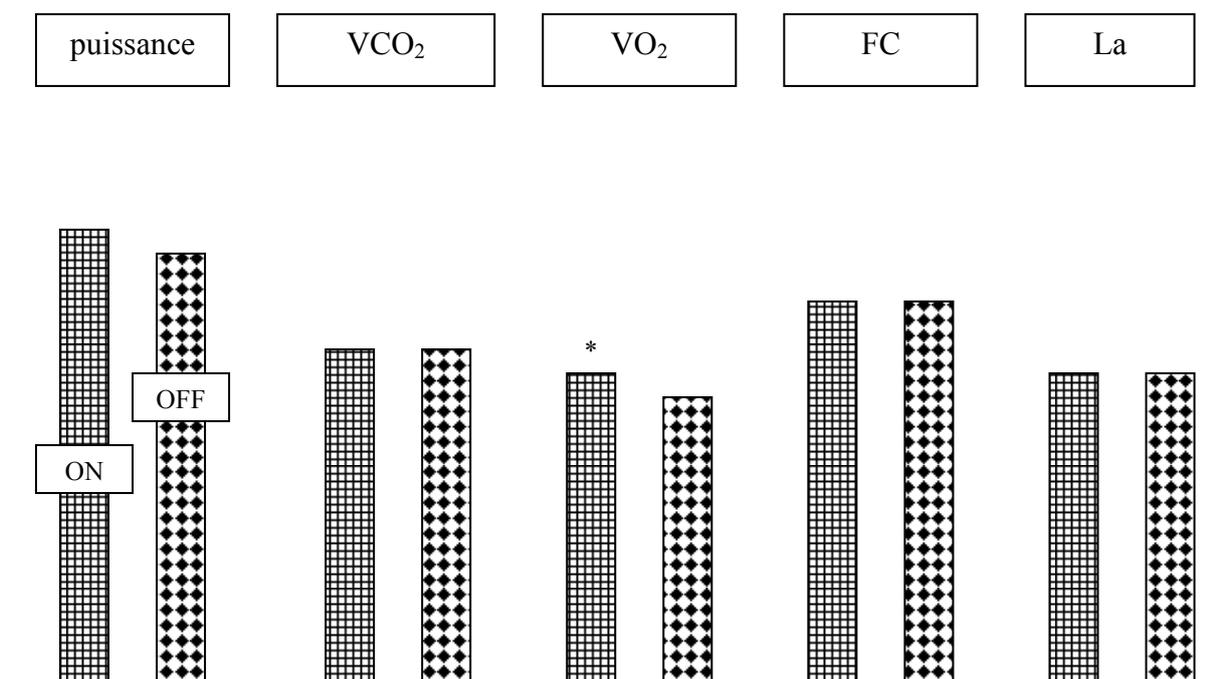


Figure 8. Représentation synthétique, non à l'échelle, des paramètres physiologiques maximaux en fonction de la période.

(\* : différence significative, p < .001)

### 1.1.3. Paramètres physiologiques au seuil

Les résultats sont présentés dans les tableaux 11 à 15.

#### **1.1.3.1 population générale**

Le tableau 11 présente les valeurs des moyennes et des écarts-type des paramètres au seuil choisi arbitrairement à une lactatémie de  $4 \text{ mmol.l}^{-1}$ . De plus, les pourcentages de ces valeurs par rapport au maximum sont présentés.

#### **1.1.3.2 population en fonction de l'âge**

Le tableau 12 présente les valeurs des paramètres au seuil en fonction de l'âge. Le G15-17 présente les valeurs significativement ( $p < .001$ ) plus faibles pour P ( $228,5 \pm 42,3 \text{ W}$ ),  $\text{VCO}_2$  ( $3,3 \pm 0,5 \text{ l.min}^{-1}$ ) et  $\text{VO}_2$  ( $3,2 \pm 0,5 \text{ l.min}^{-1}$ ). Par contre les paramètres de G18-22 ne sont pas différents de ceux de  $G > 22$ .

### **1.1.3.3 en fonction de la spécialité**

Le tableau 13 présente les paramètres au seuil, en fonction de la spécialité. Pour les Routiers et les VTT, aucune différence significative n'existe.

### **1.1.3.4 en fonction du niveau**

Le tableau 14 présente les paramètres au seuil, en fonction du niveau. Les Nationaux présentent des valeurs significativement ( $p < .001$ ) supérieures pour les paramètres P ( $307,9 \pm 30,7$  vs  $236,9 \pm 45,5$  W),  $VCO_2$  ( $3,9 \pm 0,5$  vs  $3,3 \pm 0,5$  l.min<sup>-1</sup>) et  $VO_2$  ( $3,8 \pm 0,5$  vs  $3,3 \pm 0,5$  l.min<sup>-1</sup>).

### **1.1.3.5 en fonction de la période**

Le tableau 15 présente les paramètres au seuil, en fonction de la période. Le groupe des ON présentent des valeurs significativement ( $p < .001$ ) supérieures pour les paramètres P ( $281,6 \pm 40,5$  vs  $258,6 \pm 56,6$  W),  $VCO_2$  ( $3,8 \pm 0,5$  vs  $3,4 \pm 0,6$  l.min<sup>-1</sup>) et  $VO_2$  ( $3,7 \pm 0,5$  vs  $3,4 \pm 0,6$  l.min<sup>-1</sup>).

Tableau 11. Paramètres physiologiques au seuil, choisi à une lactatémie de 4 mmol.l<sup>-1</sup>, pour la population générale.

<b>Paramètres</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Ecart-type</b>	<b>% du max</b>
Puissance (watt)	265,6	53,2	71,3
VCO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	3,5	0,6	77,4
VO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	3,5	0,6	82,4
FC (bpm)	171,5	10,6	89,3
La (mmol.l <sup>-1</sup> )	4	0,0	36,2

% du max : pourcentage de la valeur au seuil (choisi à une lactatémie de 4 mmol.l<sup>-1</sup>) vis-à-vis de cette même valeur au maximum.

Tableau 12. Paramètres physiologiques au seuil, choisi à une lactatémie de 4 mmol.l<sup>-1</sup>, en fonction de l'âge

paramètres	Echantillon			Test
	G15-17	G18-22	G> 22	ANOVA
Puissance (watt)	228,5 ± 42,3*	275,8 ± 55,2	286,2 ± 44,6	p<.001
VCO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	3,3± 0,5*	3,7 ± 0,6	3,7 ± 0,5	p<.001
VO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	3,2 ± 0,5*	3,6 ± 0,6	3,6 ± 0,5	p<.001
FC (bpm)	174,1 ± 9,6	170,4 ±10,6	170,3 ± 11,2	ns

± : écart-type ; \* différence significative (p< .001) entre G15-17 et les autres groupes ; ns : non significative.

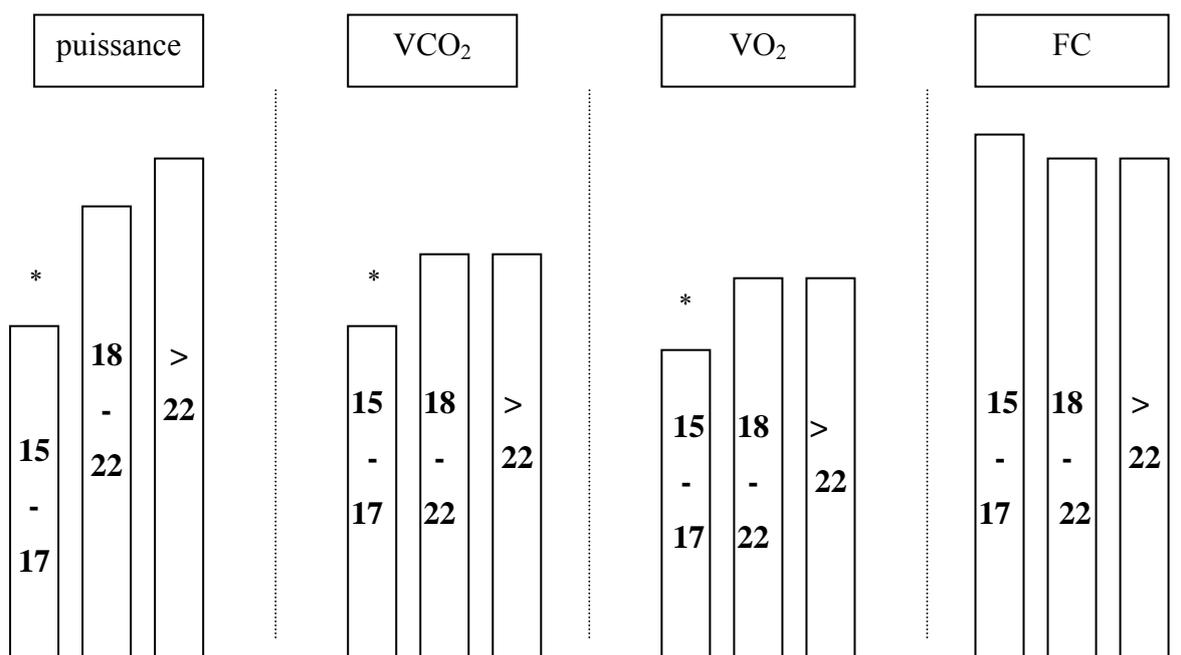


Figure 9. Représentation synthétique, non à l'échelle, des paramètres physiologiques au seuil, choisi à une lactatémie de 4 mmol.l<sup>-1</sup>, en fonction de l'âge.

Tableau 13. Paramètres physiologiques au seuil, choisi à une lactatémie de 4 mmol.l<sup>-1</sup>, en fonction de la spécialité

Paramètres	Echantillon		Test
	Route	VTT	Student
Puissance (watt)	262,0 ± 54,3	289,7 ± 37,7	ns
VCO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	3,5 ± 0,6	3,7 ± 0,4	ns
VO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	3,4 ± 0,6	3,7 ± 0,4	ns
FC (bpm)	171,6 ± 11,0	170,8 ± 8,1	ns

± : écart-type ; ns : non significatif.

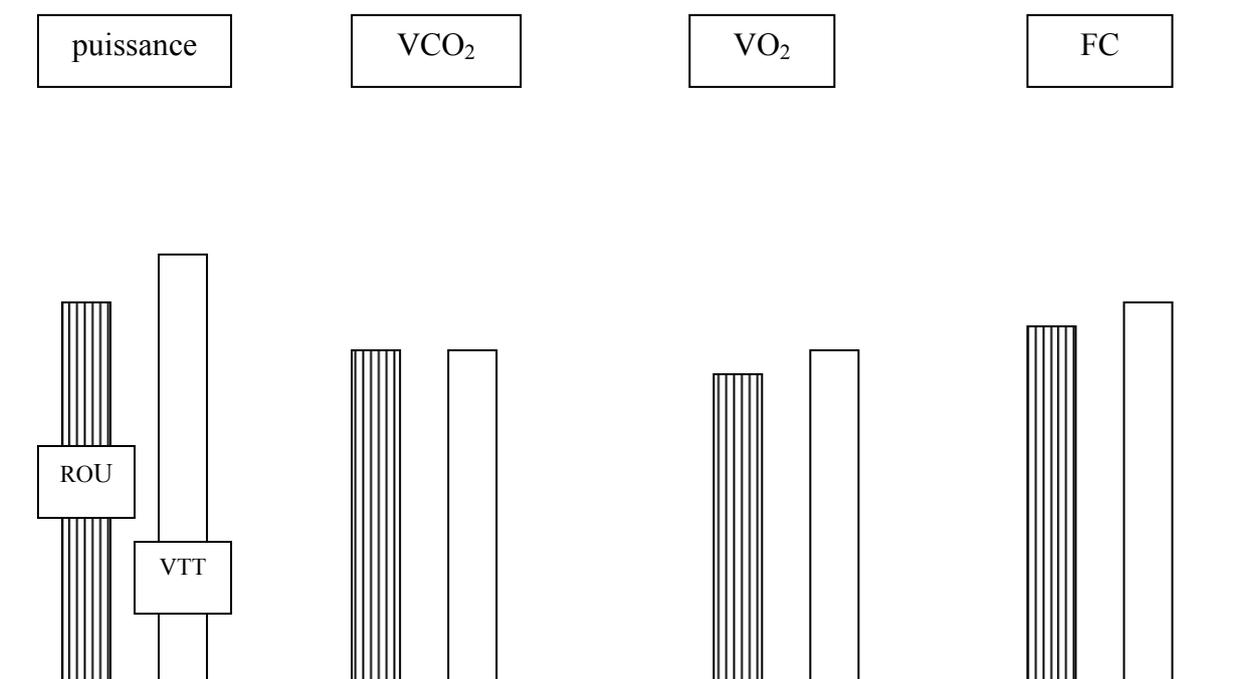


Tableau 14. Paramètres physiologiques au seuil, choisi à une lactatémie de 4 mmol.l<sup>-1</sup>, en fonction du niveau.

Paramètres	Echantillon		Test
	National	Régional	Student
Puissance (watt)	307,9 ± 30,7*	236,9 ± 45,5	p<.001
VCO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	3,9 ± 0,5*	3,3 ± 0,5	p<.001
VO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	3,8 ± 0,5*	3,3 ± 0,5	p<.001
FC (bpm)	171,5 ± 9,3	171,5 ± 11,4	ns

± : écart-type ; ns : non significatif.

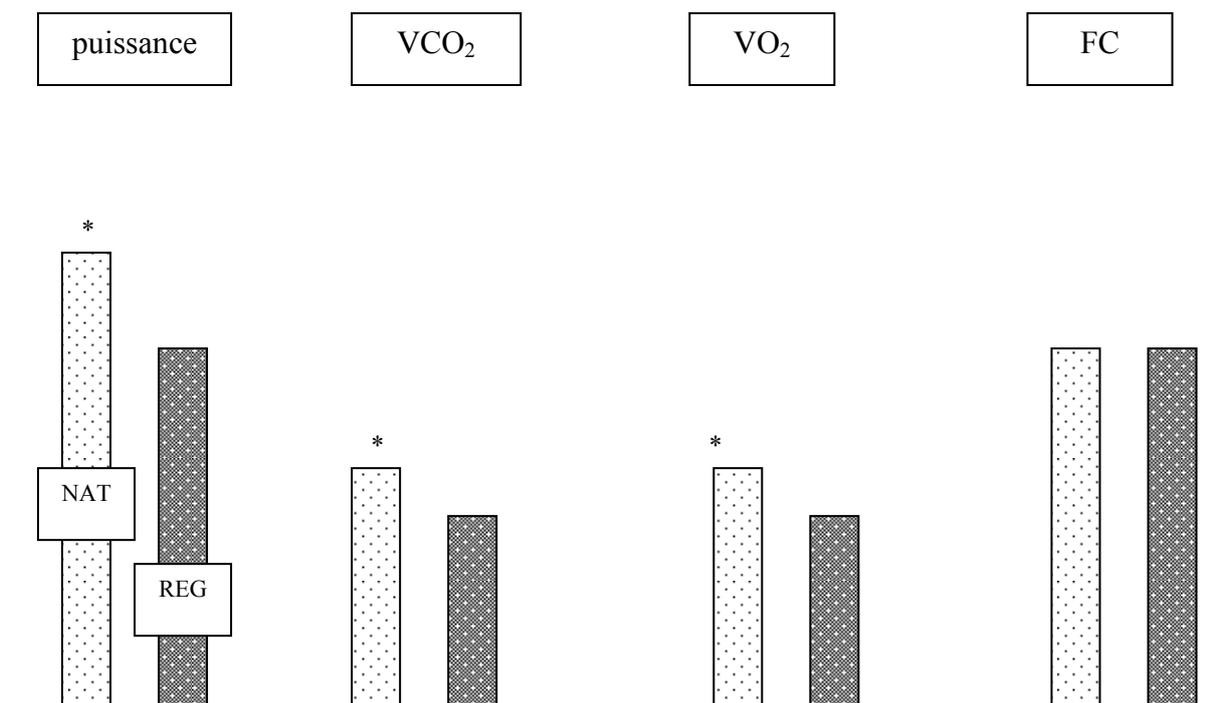


Figure 11. Représentation synthétique, non à l'échelle, des paramètres physiologiques au seuil, choisi à une lactatémie de 4 mmol.l<sup>-1</sup>, en fonction du niveau.

(\* : différence significative, p< .001)

Tableau 15. Paramètres physiologiques au seuil choisi à une lactatémie de 4 mmol.l<sup>-1</sup>, en fonction de la période

Paramètres	Echantillon		Test
	ON	OFF	Student
Puissance (watt)	281,6 ± 40,5	258,6 ± 56,6	p<.001
VCO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	3,8 ± 0,5	3,4 ± 0,6	p<.001
VO <sub>2</sub> (l.min <sup>-1</sup> )	3,7 ± 0,5	3,4 ± 0,6	p<.001
FC (bpm)	172,6 ± 8,0	171,0 ± 11,5	ns

± : écart-type ; ns : non significatif.

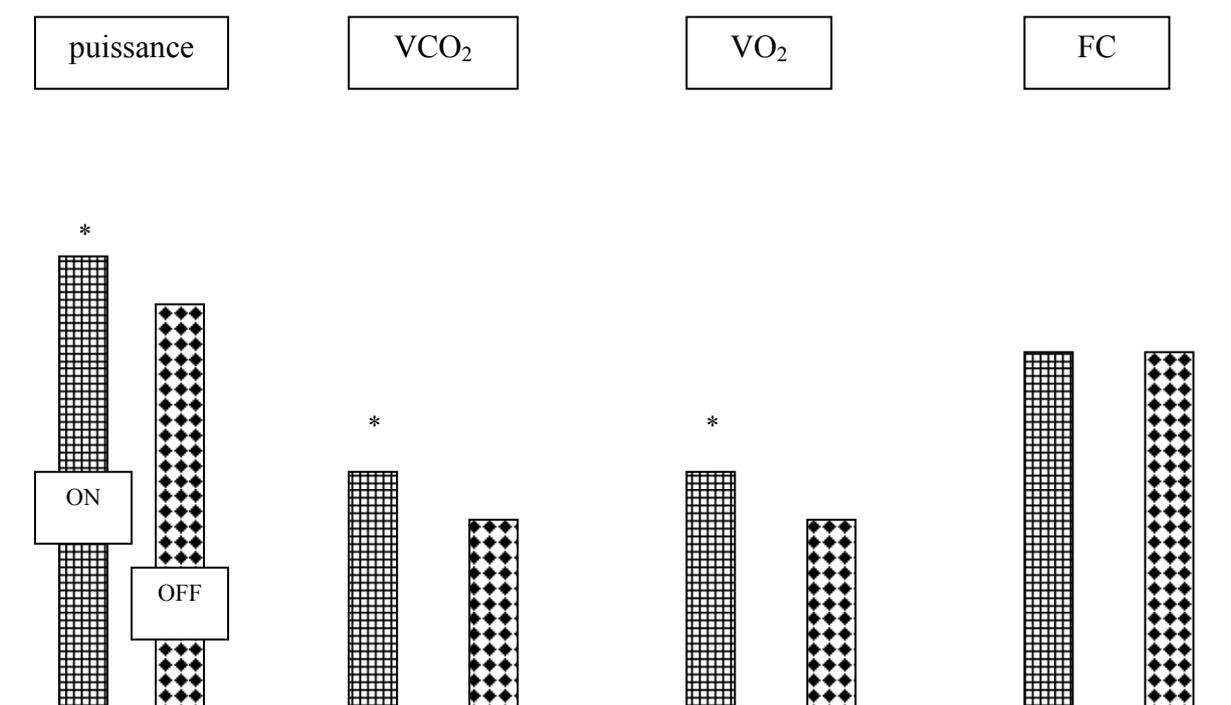


Figure 12. Représentation synthétique, non à l'échelle, des paramètres physiologiques au seuil en fonction de la période.

(\* différence significative, p< .001)

#### 1.1.4. « Gross Efficiency »

Le Tableau 16 présente les valeurs de gross efficiency (GE) en fonction des divers échantillons. Aucun test statistique n'est réalisé car il s'agit de valeurs issues de l'équation de Brower à partir de valeurs moyennes. Le G15-17 montre la GE la plus faible (17 %) et les Nationaux la plus forte (22 %).

Tableau 16. Valeurs du « gross efficiency » en fonction des différents échantillons, au seuil.

<b>Echantillon</b>	<b>Valeur (%)</b>
G15-17	17
G18-22	22
G > 22	22
ROUTE	21
VTT	22
ON	21
OFF	21
NATIONAL	23
REGIONAL	20

Les valeurs des pourcentages sont obtenues selon l'équation de Brower, à partir des valeurs moyennes des différentes populations étudiées.

## **1.2 Analyse des corrélations entre les paramètres étudiés**

Le tableau 17 présente les résultats de l'étude de corrélation pour l'ensemble de la population. Quatre degrés de magnitude apparaissent, forte ( $r > .80$ ), moyenne ( $.80 > r > .60$ ), faible ( $.60 > r > .30$ ) et très faible ( $r < .30$ ).

- les fortes corrélations, que l'on retrouve entre :

VCO<sub>2</sub>max et le paramètre VO<sub>2</sub>max (.87),

Pseuil et les paramètres VCO<sub>2</sub>seuil (.85) et VO<sub>2</sub>seuil (.85),

VCO<sub>2</sub>seuil et le paramètre VO<sub>2</sub>seuil (.97).

- les moyennes corrélations, que l'on retrouve entre :

Pmax et les paramètres VO<sub>2</sub>max (.70), Pseuil (.71), VCO<sub>2</sub>seuil (.66) et VO<sub>2</sub>seuil (.65),

VO<sub>2</sub>max et les paramètres VCO<sub>2</sub>seuil (.77) et VO<sub>2</sub>seuil (.75),

Taille et le paramètre poids (.73).

- les faibles corrélations, que l'on retrouve entre :

Pmax et les paramètres VCO<sub>2</sub>max (.54) et Age (.51),

VCO<sub>2</sub>max et les paramètres Pseuil (.38), VCO<sub>2</sub>seuil (.55) et VO<sub>2</sub>seuil (.55),

VO<sub>2</sub>max et le paramètre Pseuil (.60),

FCmax et les paramètres Pseuil (- .38) et FCseuil (.50),

Lamax et les paramètres Pseuil (- .56), VCO<sub>2</sub>seuil (- .40) et VO<sub>2</sub>seuil (- .40),

Pseuil et le paramètre Age (.44),

VCO<sub>2</sub>max et le paramètre Age (.31),

Pmax et les paramètres VCO<sub>2</sub>max (.54) et Age (.51),

- les très faibles corrélations, que l'on retrouve entre :

VCO<sub>2</sub>max et les paramètres FCseuil (- .26),

VO<sub>2</sub>max et les paramètres FCmax (- .26) et Age (.30),

FCmax et les paramètres Lamax (.28), VCO<sub>2</sub>seuil (- .29) et VO<sub>2</sub>seuil (- .28),

VCO<sub>2</sub>seuil et le paramètre Age (.29),

VO<sub>2</sub>seuil et les paramètres Taille (.25) et Age (.30),

Poids et le paramètre Age (.26),

Pmax et les paramètres Lamax (.22) et Taille (.20),

VCO<sub>2</sub>max et les paramètres FCmax (- .20), Taille (.20) et Poids (.21),

VO<sub>2</sub>max et les paramètres Lamax (- .20), FCseuil (- .20) et Taille (.24),

Pseuil et les paramètres FCseuil (.20) et Taille (.21),

VCO<sub>2</sub>seuil et les paramètres FCseuil (.21) et Taille (.24),

VO<sub>2</sub>seuil et le paramètre FCseuil (.20).

Tableau 17. Corrélation des paramètres statiques ;

	<b>VCO<sub>2</sub></b>	<b>VO<sub>2</sub></b>	<b>FC</b>	<b>La</b>	<b>P</b>	<b>VCO<sub>2</sub></b>	<b>VO<sub>2</sub></b>	<b>FC</b>	<i>Taille</i>	<i>Poids</i>	<i>Age</i>
	<b>max</b>	<b>max</b>	<b>max</b>	<b>max</b>	seuil	seuil	seuil	seuil	( <i>cm</i> )	( <i>kg</i> )	( <i>année</i> )
<b>P</b>											
<b>max</b>	.54***	.70***	-.16	-.22*	.71***	.66***	.65***	-.70***	.20*	.18	.51***
<b>VCO<sub>2</sub></b>											
<b>max</b>	1,00	.87***	-.20*	-.10	.38***	.55***	.55***	-.26**	.20*	.21*	.31**
<b>VO<sub>2</sub></b>											
<b>max</b>		1,00	-.26**	-.20*	.60***	.77***	.75***	-.20*	.24*	.16	.30**
<b>FC</b>											
<b>max</b>			1,00	.28**	-.38***	-.29**	-.28**	.50***	-.11	-.10	-.18
<b>La</b>											
<b>max</b>				1,00	-.56***	-.40***	-.40***	-.07	-.17	-.16	-.16
<b>P</b>											
seuil					1,00	.85***	.85***	.20*	.21*	.13	.44***
<b>VCO<sub>2</sub></b>											
seuil						1,00	.97***	.21*	.24*	.16	.29**
<b>VO<sub>2</sub></b>											
seuil							1,00	.20*	.25**	.17	.30**
<b>FC</b>											
seuil								1,00	.01	.03	-.12
<i>Taille</i>											
( <i>cm</i> )									1,00	.73***	.12
<i>Poids</i>											
( <i>kg</i> )										1,00	.26**

Max : valeurs à VO<sub>2</sub>max ; Seuil : valeurs au seuil choisi à une lactatémie de 4 mmol.l<sup>-1</sup> ; P : puissance (watt) ; VCO<sub>2</sub> : rejet de CO<sub>2</sub> (l.min-1) ; VO<sub>2</sub> : consommation d'oxygène (l.min-1) ; FC : fréquence cardiaque (bpm) ; La : lactatémie (mmol.l-1) ; \* : corrélations significatives à p < .05 ; \*\* : corrélation significatives à p < .01 ; \*\*\* : corrélation significatives à p < .001 ; en gras : paramètres mesurés à VO<sub>2</sub>max ; en italique : paramètres anthropométriques.

## **2. APPROCHE DYNAMIQUE : ANALYSE DE LA CINÉTIQUE DE LA CONSOMMATION D'OXYGÈNE**

Dans ce chapitre, l'analyse concernera la cinétique de la consommation d'oxygène avec calcul des droites de régression, des pentes et des intercepts, avant le seuil et après le seuil, puis l'analyse des corrélations entre les paramètres étudiés.

### ***2.1. Analyse de la normalité de la distribution des valeurs de $VO_2$ avant et après le seuil***

Les histogrammes sont présentés pour les « pentes avant et après » le seuil choisi arbitrairement à une lactatémie de  $4 \text{ mmol.l}^{-1}$ . La « pente avant » le seuil obéit à la loi normale (Cf. figure 13). La « pente après » le seuil n'obéit pas à cette loi (Cf. figure 14).

### ***2.2. Cinétique de la consommation d'oxygène pour la population générale***

La tendance générale montre une rupture de la courbe au niveau du seuil arbitrairement choisi à une lactatémie de  $4 \text{ mmol.l}^{-1}$  (Cf. figure 15). Cette rupture présente une chute de la consommation d'oxygène ( $\text{incessO}_2$ ) au-delà du seuil. Elle est représentée par la figure 13.

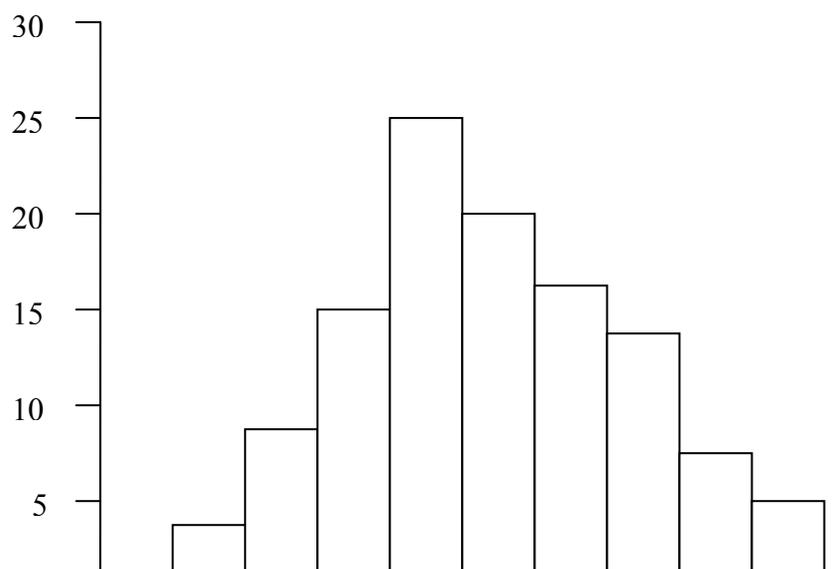


Figure 13. Histogramme des valeurs de  $VO_2$  avant le seuil choisi arbitrairement à une lactatémie de  $4 \text{ mmol.l}^{-1}$ .

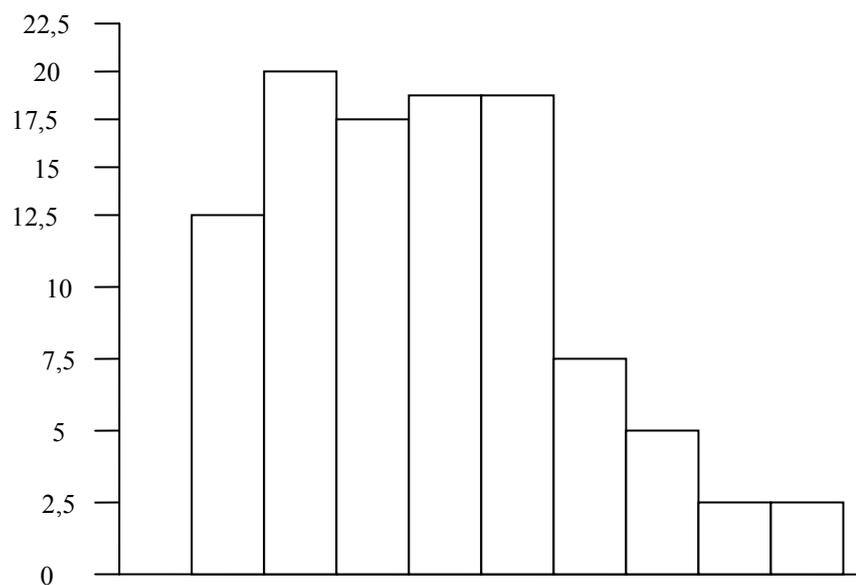


Figure 14. Histogramme des valeurs de VO<sub>2</sub> après le seuil choisi arbitrairement à une lactatémie de 4 mmol.l<sup>-1</sup>.

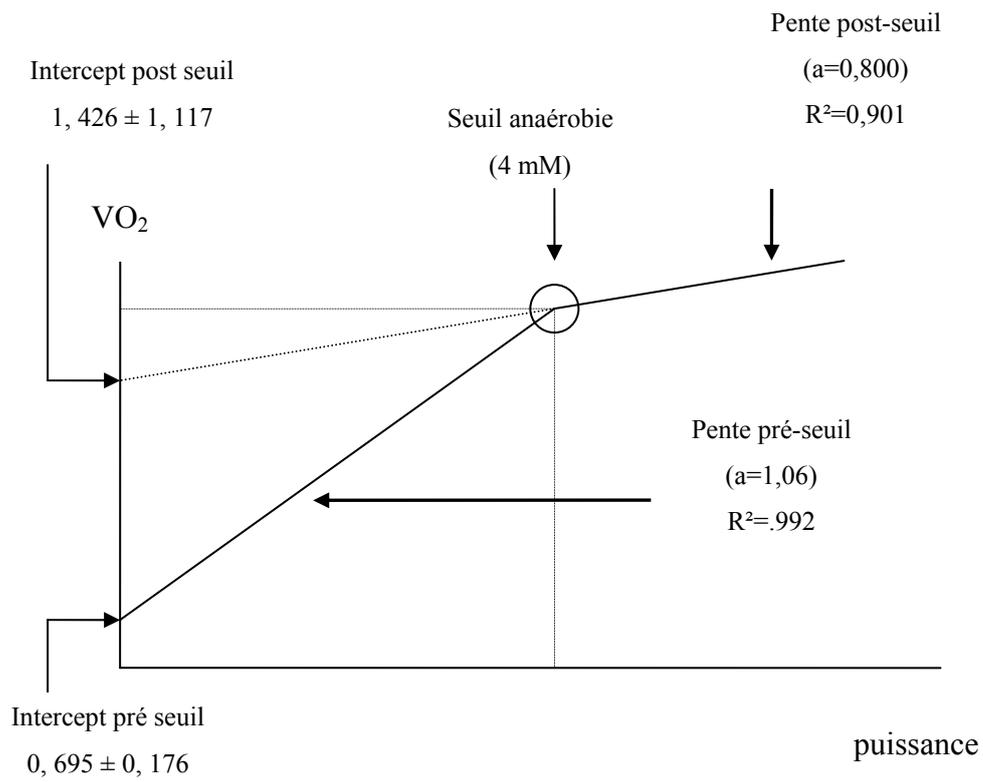


Figure 15. Représentation schématique de la courbe de tendance pour l'échantillon total.

### **2.3. Analyse de la cinétique en fonction des groupes**

Les données sont présentées dans les tableaux 18 à 21.

#### **2.3.1. En fonction de l'âge**

Les données sont présentées dans le tableau 18. Pour les trois groupes d'âge, la seule différence significative est entre leur « pente avant » et leur « pente après ». ( $p < .001$ ) .

Il existe une différence significative ( $p < .001$ ) pour les « intercepts avant » entre le G18-22 et le G>22. Il n'existe aucune différence significative pour les « intercepts après ». Les trois groupes d'âge présentent un « intercep après » supérieur ( $p < .001$ ) à l' « intercept avant ».

#### **2.3.2. En fonction de la spécialité**

Les données sont présentées dans le tableau 19. La « pente après » est inférieure ( $p < .001$ ) chez les VTT par rapport aux Routiers.

#### **2.3.3. En fonction du niveau**

Les données sont présentées dans le tableau 20. La « pente avant » est inférieure ( $p < .001$ ) chez les Nationaux. De même l' « intercept avant » est inférieur ( $p < .001$ ) chez les NAT.

#### **2.3.4. En fonction de la période**

Les données sont présentées dans le tableau 21.

<p>Au total, les « intercepts avant » et les « pentes avant » sont discriminants du niveau. Quant à la « pente après » elle est discriminante de la spécialité.</p>
---

Tableau 18. Valeur moyenne des paramètres dynamiques en fonction des groupes d'âge.

	Avant seuil	Après seuil	Student
Pente G15-17	1,081 ± 0,119	0,776 ± 0,272	p<.001
Pente G18-22	1,059 ± 0,109	0,849 ± 0,344	p<.001
Pente G>22	1,038 ± 0,120	0,782 ± 0,300	p<.001
ANOVA	ns	ns	
Intercept G15-17	0,715 ± 0,199	1,618 ± 0,932	p<.001
Intercept G18-22	0,741 ± 0,148 <sup>§</sup>	1,228 ± 1,369	p<.001
Intercept G>22	0,644 ± 0,167 <sup>§</sup>	1,431 ± 1,031	p<.001
ANOVA	p< .05	ns	

§ : différence significative, p< .05 avec les 2 autres groupes.

Tableau 19. Valeur moyenne des paramètres dynamiques en fonction des groupes spécialité.

	Avant seuil	Après seuil	Student <sup>1</sup>
Pente ROUTE	1,060 ± 0,118*	0,824 ± 0,307§	p<.001
Pente VTT	1,042 ± 0,109*	0,645 ± 0,250	p<.001
Student <sup>2</sup>	ns	p < .001	
Intercept ROUTE	0,695 ± 0,181	1,426 ± 1,117*	p<.001
Intercept VTT	0,692 ± 0,141	1,870 ± 0,841*	p<.001
Student <sup>2</sup>	ns	ns	

<sup>1</sup> : test de Student pour les valeurs en ligne ; <sup>2</sup> : test de Student pour les valeurs en colonne.

Tableau 20. Valeur moyenne des paramètres dynamiques en fonction des groupes niveau.

	Avant seuil	Après seuil	Student <sup>1</sup>
Pente			
NATIONAUX	1,025 ± 0,110	0,836 ± 0,369	p<.001
Pente			
REGIONAUX	1,079 ± 0,117	0,776 ± 0,253	p<.001
Student <sup>2</sup>	p<.001	ns	
Intercept	0,651 ± 0,183	1,186 ± 1,424	p<.001
NATIONAUX			
Intercept	0,725 ± 0,165	1,589 ± 0,824	p<.001
REGIONAUX			
Student <sup>2</sup>	p<.001	ns	

<sup>1</sup> : test de Student pour les valeurs en ligne ; <sup>2</sup> : test de Student pour les valeurs en colonne.

Tableau 21. Valeur moyenne des paramètres dynamiques en fonction des groupes période.

	Avant seuil	Après seuil	Student <sup>1</sup>
Pente ON	1,083 ± 0,100	0,829 ± 0,313	p<.001
Pente OFF	1,046 ± 0,122	0,787 ± 0,302	p<.001
Student <sup>2</sup>	ns	ns	
Intercept ON	0,648 ± 0,207	1,396 ± 1,057	p<.001
Intercept OFF	0,715 ± 0,158	1,439 ± 1,149	p<.001
Student <sup>2</sup>	ns	ns	

<sup>1</sup> : test de Student pour les valeurs en ligne ; <sup>2</sup> : test de Student pour les valeurs en colonne.

## **2.4. Analyse de covariance**

### **2.4.1. Effet niveau**

Notre modèle prend pour variable dépendante la « pente avant », pour première variable indépendante le niveau et comme deuxième variable indépendante l'âge.

On introduit la « pente avant » comme variable dépendante.

On introduit le niveau comme indépendante :  $p < 0,0165$ .

L'effet niveau est significatif sur la « pente avant » ( $p < .05$ ).

On introduit la variable confondante âge dans le modèle :  $p = 0,2398$ .

L'âge n'interfère pas directement sur le niveau.

Mais lors de l'analyse des effets principaux du niveau en tenant compte de l'effet de l'âge dans le modèle, il n'y a plus de différence significative entre les niveaux. L'effet de l'âge est non significatif. L'âge n'a pas d'effet direct sur la « pente avant », mais l'absence de significativité du niveau en tenant compte de l'âge montre un effet indirect de l'âge sur la « pente avant ».

Notre modèle prend pour variable dépendante l'« intercept avant », pour première variable indépendante le niveau et comme deuxième variable indépendante l'âge.

On introduit l'« intercept avant » comme variable dépendante.

On introduit le niveau comme indépendante :  $p < 0,05$ .

L'effet niveau est significatif sur l'« intercept avant » ( $p < .05$ ).

On introduit la variable confondante âge dans le modèle :  $p = 0,2146$ .

L'âge n'interfère pas directement sur le niveau.

Mais lors de l'analyse des effets principaux du niveau en tenant compte de l'effet de l'âge dans le modèle, il n'y a plus de différence significative entre les niveaux ( $p = 0,1124$ ). L'effet de l'âge est non significatif. L'âge n'a pas d'effet direct sur l' « intercept avant », mais l'absence de significativité du niveau en tenant compte de l'âge montre un effet indirect de l'âge sur l' « intercept avant ».

#### 2.4.1. Effet spécialité

Notre modèle prend pour variable dépendante la « pente après », pour première variable indépendante la spécialité et comme deuxième variable indépendante l'âge.

On introduit la « pente après » comme variable dépendante.

On introduit la spécialité comme indépendante :  $p < 0,0165$ .

L'effet spécialité est significatif sur la « pente après » ( $p < .05$ ).

On introduit la variable confondante âge dans le modèle :  $p = 0,4271$ .

L'âge n'interfère pas directement sur la spécialité.

Mais lors de l'analyse des effets principaux de la spécialité en tenant compte de l'effet de l'âge dans le modèle, il y a une différence significative entre les spécialités ( $p < .05$ ), alors que l'âge ne présente pas d'effet direct ( $p = .7763$ ).

L'âge n'influence pas la « pente après », en ce qui concerne la spécialité.

## **2.5. Analyse de prédiction**

La spécialité agit sur la pente indépendamment de l'âge. Recherchons alors les facteurs pouvant induire les différences observées pour le niveau et la spécialité.

### **2.5.1. Déterminant pour le niveau**

Les valeurs corrélées à la « pente avant » sont présentées ci-dessous (Cf. figure 16) :

P seuil	$r = - 0, 20$	$p < .05$
VO <sub>2</sub> seuil	$r = 0, 22$	$p < . 05$
VCO <sub>2</sub> max	$r = 0, 29$	$p < . 01$
VO <sub>2</sub> max	$r = 0, 27$	$p < . 01$

VO<sub>2</sub> seuil et VO<sub>2</sub>max sont fortement corrélées ( $r = 0,73$ ,  $p < 0, 0001$ ). Or, après analyse de covariance, on a :

VO<sub>2</sub> max et VCO<sub>2</sub> max n'interviennent pas dans la « pente avant » par rapport au niveau ;

P seuil : influence l'effet du niveau sur la « pente avant ».

### **2.5.2. Déterminant pour la spécialité**

La « pente après » est corrélée avec (Cf. figure 17) :

FC seuil	$r = - 0, 32$	$p < 0, 001$
Le seuil	$r = - 0, 20$	$p < 0, 05$
P max	$r = - 0, 25$	$p < 0, 01$
VCO <sub>2</sub> max	$r = 0, 29$	$p < 0, 01$
VO <sub>2</sub> max	$r = 0, 27$	$p < 0, 01$
FC max	$r = - 0, 23$	$p < 0, 05$

Or, après analyse de covariance, seule P max présente un effet sur la spécialité pour la « pente après ».

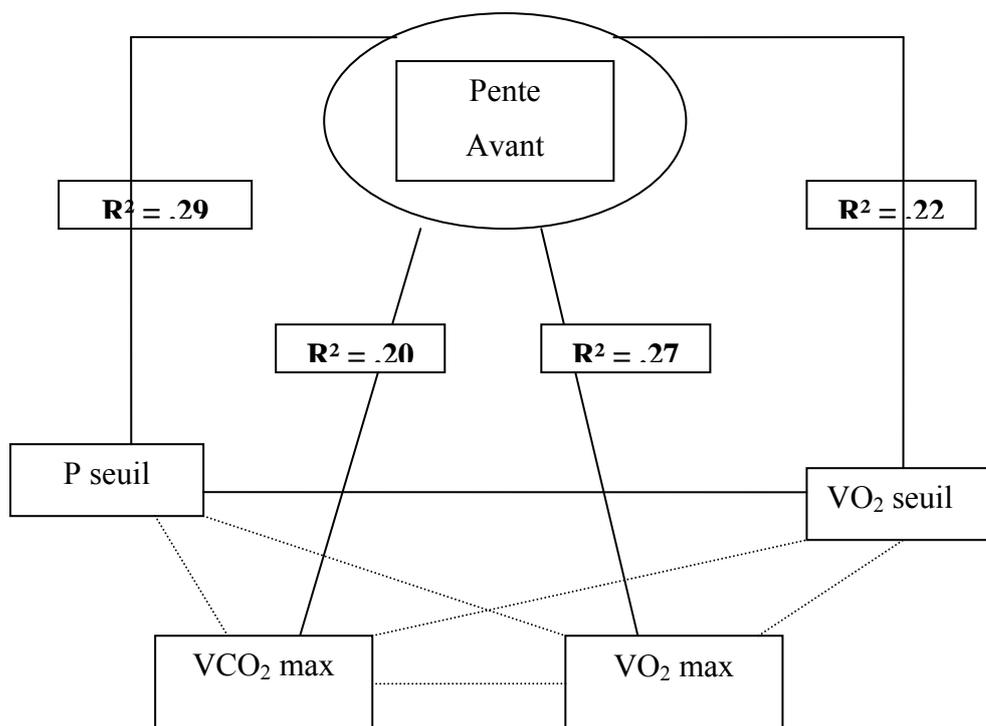


Figure 16. Présentation schématique des corrélations avec la « pente avant », pour la détermination des facteurs influençant le niveau.

(les lignes pointillées présentent les corrélations significatives)

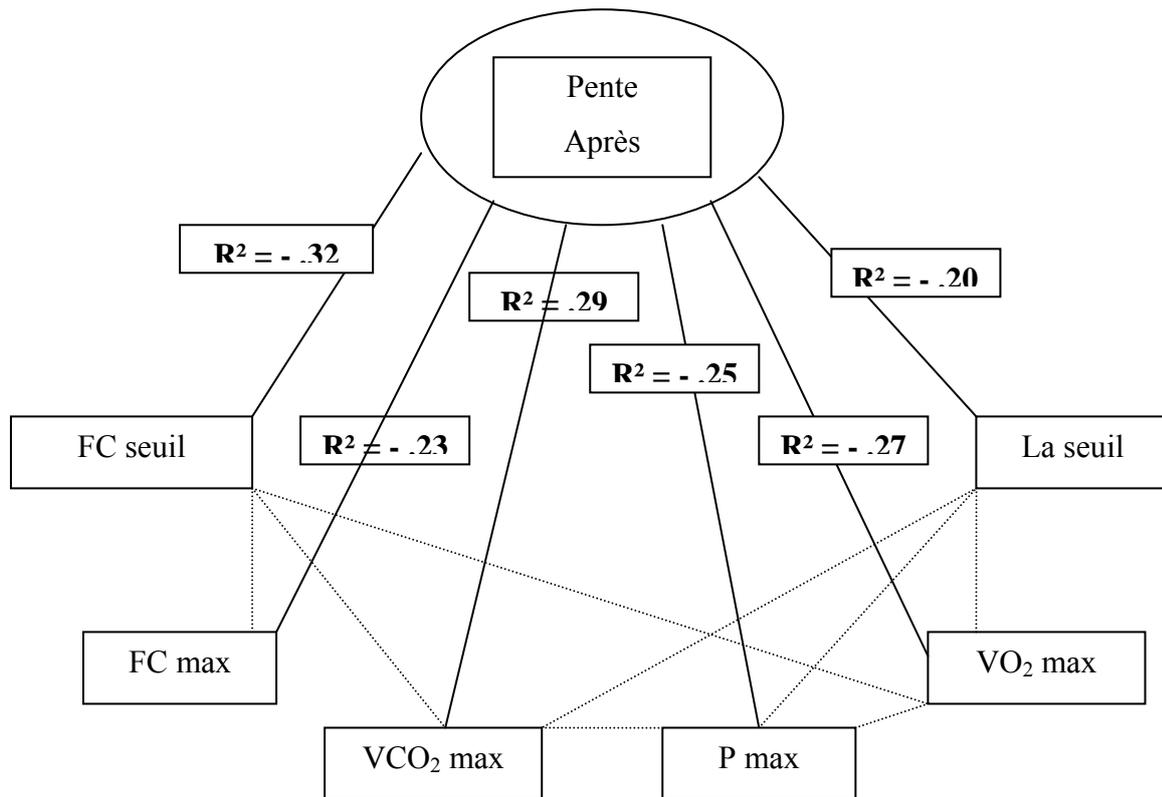


Figure 17. Présentation schématique des corrélations avec la « pente après », pour la détermination des facteurs influençant la spécialité.

(les lignes pointillées présentés les corrélations significatives)

## 2.6. Régression pas à pas

L'analyse précédente ressort que le niveau et la spécialité sont liés à P, qui est un facteur discriminant. Or, P max est fortement corrélée à la P seuil (0, 71,  $p < 0,0001$ ) et avec (Cf. figure 18) :

Age	$r = 0,52$	$p < 0,0001$
VCO <sub>2</sub> seuil	$r = 0,66$	$p < 0,0001$
VO <sub>2</sub> seuil	$r = 0,65$	$p < 0,0001$
VCO <sub>2</sub> max	$r = 0,54$	$p < 0,0001$
VO <sub>2</sub> max	$r = 0,70$	$p < 0,0001$

Ainsi, la régression pas à pas ascendante nous apporte comme facteurs les plus pertinents pour prédire la Pmax :

1	VO <sub>2</sub> max	$r = 0,70$
2	Age	$r = 0,45$
3	VCO <sub>2</sub> seuil	$r = 0,31$
4	VCO <sub>2</sub> max	$r = 0,22$
5	VO <sub>2</sub> seuil	

## 2.7. Régression multiple

Tous les paramètres précédents sont pertinents dans le même ordre et définissent un  $R^2$  de 0,663 (la prédiction explique 66 % de la puissance maximale). Les coefficients partiels sont :

Paramètres	Coefficients partiels
VO <sub>2</sub> max	0,850
âge	0,334
VCO <sub>2</sub> seuil	0,774
VCO <sub>2</sub> max	-0,387
VO <sub>2</sub> seuil	-0,622

pour une équation :

$P_{\max} =$ $0,850 \text{ VO}_2\text{max} + 0,334 \text{ âge} + 0,774 \text{ VCO}_2 \text{ seuil} - 0,387 \text{ VCO}_2\text{max} - 0,622 \text{ VO}_2 \text{ seuil} + 37,9$ $(R^2 \text{ de } 0,663)$
---

Ainsi, si on ne peut pas faire un test maximal, on enlève dans l'équation tous les paramètres maximaux. Le niveau de prédiction tombe à 0,554, et les paramètres au seuil ne sont plus pertinents. Par contre, c'est l'âge qui, dans le modèle prédit la puissance.

Et donc, si on prédit la puissance seulement en fonction de l'âge, l'équation devient :

$P_{\max} = 245,377 + 5,402 \text{ âge}$ $(R^2 \text{ de } 0,27)$
---

Le  $R^2$  est alors trop faible.

## 2.8. Déterminant du type de réponse

L'allure générale de la cinétique de l'oxygène présente une rupture de pente (incessO<sub>2</sub>) après le seuil. Pour chaque groupe la réponse est identique.

Ainsi, il s'agit de comparer la représentation schématique de l'incesO<sub>2</sub>, le *delta slope* ( $\Delta$ slope = « pente près » – « pente avant »).

L'analyse statistique en fonction des groupes ne montre aucune différence significative, ce qui confirme que tous les groupes ont le même type de réponse.

Quant aux corrélations générales, elle présente un lien entre  $\Delta$ slope (Cf. figure 19) et :

FC seuil	$r = - 0, 26$	$p < 0, 01$
La max	$r = - 0, 20$	$p < 0, 05$
P max	$r = - 0, 24$	$p < 0, 05$
FC max	$r = - 0, 26$	$p < 0, 01$

Toutes ces corrélations sont négatives, or ces paramètres sont en général représentatifs d'une forte participation anaérobie.

Afin d'éliminer l'hypothèse d'une incessO<sub>2</sub> liée à une trop haute intensité choisi pour le seuil, une deuxième étude est réalisée à partir du seuil ventilatoire, défini comme l'intensité à laquelle la lactatémie augmente de 0, 5 mmol.l<sup>-1</sup>, par rapport au niveau de base.

Seuls 89 sujets sont conservés. Ceux qui ne présentent pas une détermination précise du seuil ventilatoire sont retirés. Les résultats présentés dans le tableau 22 confirment la même tendance observée dans le tableau 23 pour un seuil choisi arbitrairement à une lactatémie de 4 mmol.l<sup>-1</sup>.

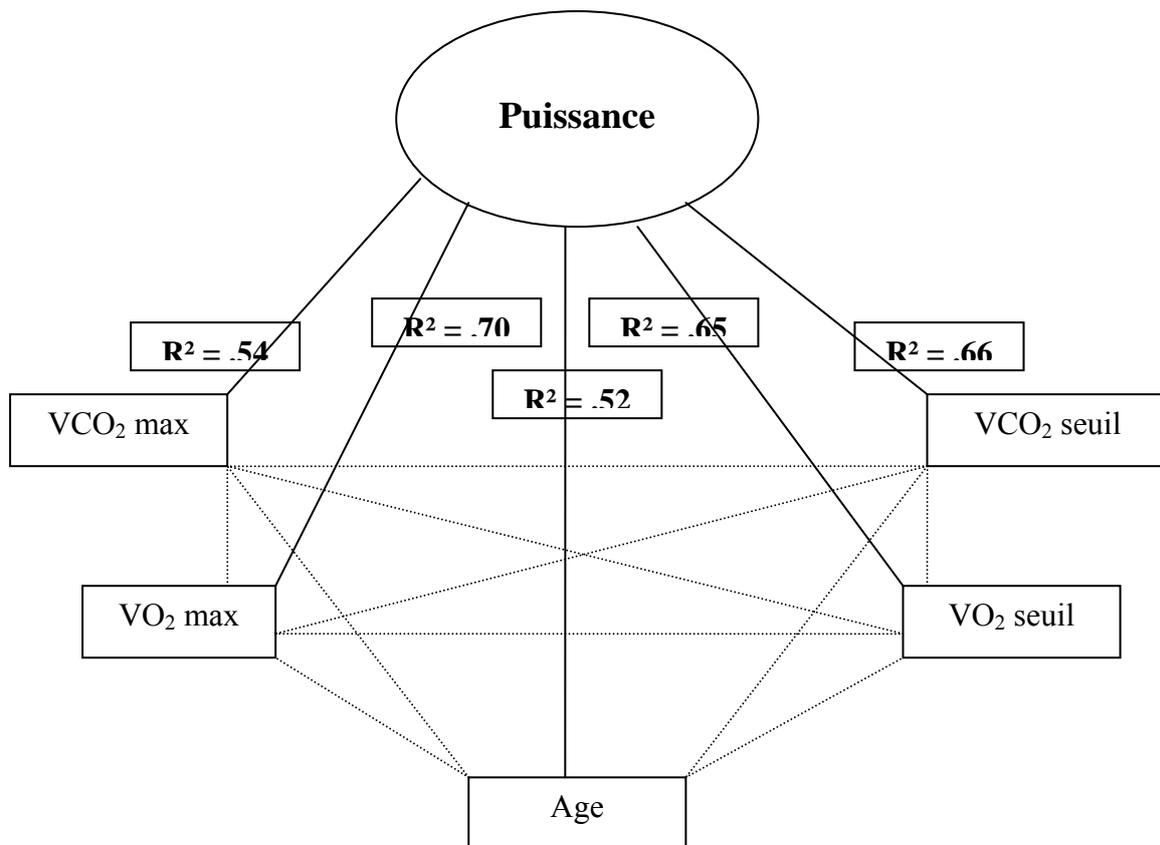


Figure 18. Présentation schématique des corrélations avec la puissance, pour la régression pas à pas.

(les lignes pointillées présentent les corrélations significatives)

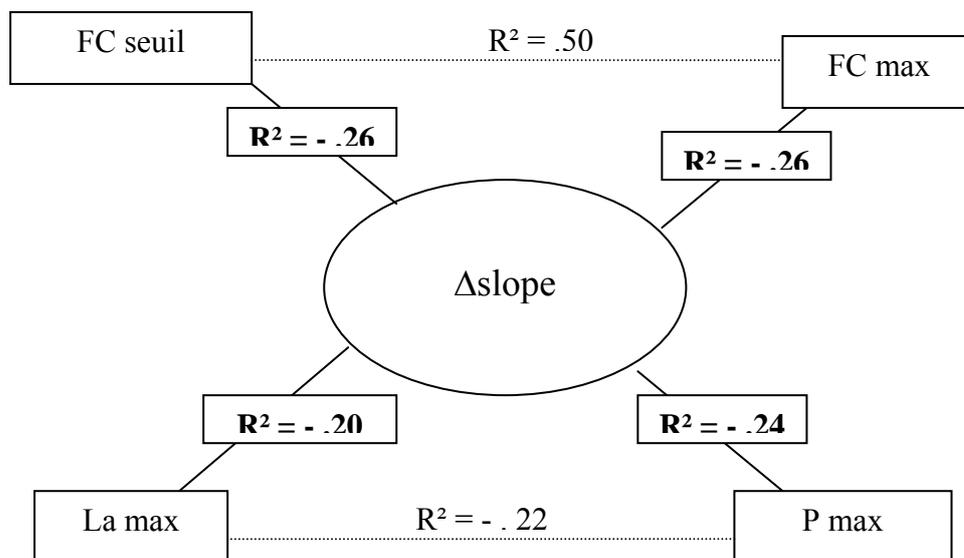


Figure 19. Présentation schématique des corrélations avec la  $\Delta$ slope afin de déterminer le type de réponse.

(les lignes pointillées présentent les corrélations significatives)

Tableau 22. Indices de l'étude dynamique pour le seuil ventilatoire.

	Avant	Après	Student
Pente	1,04 ± 0,14	0,93 ± 0,19	p < 0,001
Intercept	0,68 ± 0,17	0,97 ± 0,54	p < 0,001
R <sup>2</sup>	0,988 ± 0,011	0,952 ± 0,048	p < 0,001

Tableau 23. valeurs moyennes de la tendance générale (n=109)

	Avant	Après	Student
Pente	1,057 ± 0,117	0,800 ± 0,305	p<.001
Intercept	0,695 ± 0,176	1,426 ± 1,117	p<.001
R <sup>2</sup>	0,992 ± 0,007	0,9010 ± 0,12	p<.001

# DISCUSSION

Dans ce chapitre, l'analyse concernera l'approche critique du protocole, puis de de l'aspect maximal du test, puis des résultats au seuil et enfin de la cinétique de la consommation d'oxygène.

## 1. ETUDE CRITIQUE DU PROTOCOLE

Notre étude, concernant l'analyse des paramètres statiques et dynamiques enregistrés au cours d'un test d'effort, a porté sur 109 cyclistes et utilise un ergocyclomètre électromagnétique de type ORION<sup>®</sup>. Le protocole a consisté en une incrémentation de 50 w toutes les 3 minutes, à une cadence de 90 rpm. La chaîne d'analyse des gaz expirés est de type CPX<sup>®</sup> Medgraphics<sup>®</sup>. Afin de pouvoir effectuer des comparaisons objectives et pertinentes entre les données de la littérature et les résultats de notre étude, nous avons délibérément retenus que les seules études ciblées sur la  $\dot{V}O_2$  lors de tests incrémentaux. Les études sont les suivantes : Buck et Mc Naughton (1999), Carter et coll. (2000), Delorey et coll. (2003), Grassi et coll. (2003), Koga et coll. (2001), Londeree et coll. (1997), Lucia et coll. (2002b), Lucia et coll. (2002c), Pedersen et coll. (2002), Perez et coll. (2003), Pringle et coll. (2003), Scheuermann et coll. (2002), Zoladz et coll. (1998a), Zoladz et coll. (1998b) et Zoladz et coll. (1998c).

L'étude de la littérature permet de constater que les auteurs utilisent des protocoles et des matériels variés. De même, le nombre de sujet est variable.

Dans un premier temps nous discuterons des différentes variables qui constituent l'ensemble des protocoles utilisés dans la littérature, puis nous établirons d'éventuelles différences avec notre étude.

### **1.1. Nombre et nature des sujets**

Les études concernant la cinétique de l'oxygène au cours de test d'effort maximaux ont porté sur des populations variables concernant le nombre de sujets étudiés, leurs aptitudes physiques et les disciplines sportives respectives.

Le nombre des sujet des études varie de 40 (Londeree et coll., 1997) à 6 (Koga et coll., 2001 ; Zoladz et coll., 1998a). Statistiquement on considère qu'un grand échantillon correspond à 30 sujets. Au vu des études présentée aucune n'a porté sur un grand échantillon. En effet, Londeree et coll. (1997) ont 40 sujets, mais il s'agit de 20 femmes et de 20 hommes. Leur étude correspond donc à deux fois 20 et non 40. Ensuite, Zoladz et coll. (1998c) présentent 26 sujets et Scheuermann et coll. (2002) étudient 15 sujets (8 sujets adultes et 7 jeunes). Quant aux autres, aucune ne dépasse les 12 sujets. Notre étude s'est réalisée sur un ensemble homogène de 109 sujets.

Sur l'ensemble des études, seule deux s'intéressent à des cyclistes, il s'agit de Buck et Mc Naughton, (1999) qui étudient 8 cyclistes amateurs et de Lucia et coll. (2002b) qui étudient 12 professionnels. Pour notre étude, tous les sujets sont cyclistes.

De plus, deux études sont effectuées sur des sujets actifs. Les uns (au nombre de 12) sont étudiants en EPS (Pedersen et coll., 2002), les autres (au nombre de 7) sont actifs (Carter et coll. (2000).

Une étude porte aussi sur 10 sujets non entraînés (Grassi et coll., 2003), tandis que les autres portent sur des sujets sains dont l'activité n'est pas précisée.

Toutes les caractéristiques sont résumées dans le tableau A (ci-dessous).

Tableau 24, caractéristiques des sujets auteurs	nombre	activités
Buck D et Mc Naughton (1999)	8 hommes	cyclistes
Carter et coll. (2000)	7 hommes	actifs
Delorey et coll. (2003)	11 (5 hommes et 6 femmes)	sains
Grassi et coll. (2003)	10 hommes	non entraînés
Koga et coll. (2001)	6 hommes	sains
Londeree et coll. (1997)	20 hommes et 20 femmes	sains
Lucia et coll. (2002c)	10 hommes	sains
Lucia A et coll. (2002b)	12 hommes	cyclistes professionnels
Pedersen et coll. (2002)	12 hommes	étudiant d'EPS
Perez et coll. (2003)	15 hommes	sains
Pringle et coll. (2003)	10 hommes	sains
Scheuermann et coll. (2002)	8 hommes et 7 jeunes	sains
Zoladz et coll. (1998a)	6 hommes	sains
Zoladz et coll. (1998b)	12 hommes	sains
Zoladz et coll. (1998c)	26 hommes	sains

## **1.2. Ergocycles**

Les études recensées dans la littérature ont porté sur 5 types d'ergocyclomètres différents :

- à frein électromagnétique :

1 étude sur MGA-1100 (Koga et coll., 2001),

2 études sur Lode (Scheuermann et coll., 2002 et Buck et Mc Naughton, 1999),

3 études sur ergo-line 900 (Lucia et coll., 2002b ; Lucia et coll., 2002c ; Perez et coll., 2003),

5 études sur ergo-line 800 (Pringle et coll., 2003 ; Zoladz et coll., 1998a ; Zoladz et coll., 1998b ; Zoladz et coll., 1998c ; Carter et coll., 2000),

- à frein mécanique :

1 étude sur Monark (Pedersen et coll., 2002).

Ces appareillages sont validés par divers auteurs. Ainsi, Lakomy (1986) montre que les ergocyclomètres mécaniques (à friction) sont valides, mais qu'ils présentent une sous estimation de la puissance exprimée et nécessitent une équation de correction, ce que confirme Pedersen et coll. (2002). De même, Jensen et Johansen (1998) montrent que les ergocycles électromagnétiques présentent des valeurs de puissance à  $VO_2$ max et au seuil 4 mM cohérentes, tandis que Perez et coll. (2003) estiment que les ergocyclomètres à frein électromagnétique sont préférables pour l'évaluation de l'endurance.

L'ergocyclomètre que nous avons utilisé dans notre étude peut être considéré comme équivalent sur le plan conceptuel aux différents ergocyclomètres adoptés de manière consensuelle par les divers auteurs recensés.

Nous ne nous attarderons pas sur les réglages propres aux cyclistes (pédales, hauteur de selle, ...), car peu d'études s'attardent sur ces points, et d'autant plus que leurs sujets ne sont pas tous des spécialistes.

### **1.3. Incréments**

L'incrémentation offre plusieurs choix :

- un ramp test,
- un test incrémental par palier.

Le ramp test correspond à une augmentation régulière et progressive de l'intensité, sans temps de stabilisation de celle-ci, alors que l'incrémental propose des paliers variables en durée et en intensité. Au regard de la littérature, on observe que certains auteurs se prévalent d'utiliser un ramp test. En fait, tous les protocoles présentent, non pas une augmentation progressive mais un enchaînement de paliers allant de 12 secondes (Pringle et coll., 2003) à trois minutes (Zoladz et coll., 1998b ; Zoladz et coll., 1998c). Ainsi, 3 études utilisent un protocole de 20w/minutes (Lucia et coll., 2002c ; Grassi et coll., 2003 ; Pedersen et coll., 2002), 6 de 25w/minute (Buck D et Mc Naughton, 1999 ; Delorey et coll., 2003 ; Koga et coll., 2001 ; Perez et coll., 2003 ; Scheuermann et coll., 2002 ; Pringle et coll., 2003), 2 de 30w/3 minutes (Zoladz et coll., 1998b ; Zoladz et coll., 1998c), 1 de 30w/minute (Zoladz et coll., 1998a) et 1 de 40w/minute (Lucia et coll., 2002b).

Notre protocole est réalisé pour un incrément de 50 w toutes les 3 minutes. Ce choix nous paraît indiqué dans la mesure où les facteurs cardio-vasculaires atteignent leur stabilité qu'après 2 à 3 minutes (Perey et Candaux, 2002 ; Spurway, 1992). Ceci permet une détection plus fine du seuil anaérobie.

#### **1.4. Cadence de pédalage**

Les cadences sont peu différentes dans la littérature. Une seule étude (Koga et coll., 2001) utilise une cadence de 60 rpm, alors que la majorité opte pour des cadences de pédalage entre 70 et 80 rpm. De plus, deux études utilisent une cadence libre (Scheuermann et coll., 2002 ; Londeree et coll., 1997).

La cadence est décrite comme influençant la dépense énergétique et l'efficacité musculaire (Mc Daniel et coll., 2002). Elle est gouvernée par plusieurs phénomènes physiologiques comme la fréquence d'activation et de relaxation du muscle et sa vitesse de raccourcissement (Mc Daniel et coll., 2002). Or, comme la puissance correspond au produit de la force par la vitesse, cela signifie que si la vitesse de pédalage augmente, la vitesse de raccourcissement du muscle augmente (donc le recrutement des fibres rapides, nommées fII) et sa force nécessaire diminue (Mc Daniel et coll., 2002). Ainsi, la cadence pourrait agir sur le recrutement des fII. De plus, Barbeau et coll. (1993) montrent qu'une cadence faible, pour une puissance donnée, atténue la dépense énergétique. Cette étude est confirmée par Smith et coll. (2001) qui montrent qu'un exercice réalisé à 85 rpm est moins économique qu'un exercice réalisé à 60 ou 70 rpm, à puissance égale.

Par contre, le choix d'une cadence de pédalage libre se traduit par une « gross efficiency » inférieure à celle observée pour un pédalage défini, lors d'efforts de faible intensité ou inférieur à 250 w. Indépendamment de la cadence de pédalage, on peut atteindre le maximum cardio-vasculaire (Moseley et coll., 2004 ; Hansen et coll., 2002 ; Marsh et coll., 2000 ; Swain et Wright, 1997 ; Gotshall et coll., 1996).

Cependant Lucia et coll. (2001b) considèrent qu'une cadence de 90 rpm est plus économique, chez le cycliste professionnel. Ceci a été confirmé depuis par Lepers et coll. (2001). D'un point de vu entraînement, l'optimisation de la cadence repose sur plusieurs hypothèses :

- économie réalisée par le système nerveux dans la réalisation du geste cycliste (Lepers et coll., 2001 ; MacIntosh et coll., 2004),
- moindre participation anaérobie (Lepers et coll., 2001),
- recrutement musculaire (Sarre et coll., 2003 ; Vercruyssen et coll., 2002 ; Lepers et coll., 2001),
- expression de la force musculaire (Smith et coll., 2001),
- limitation des phases isométriques dans le pédalage (Smith et coll., 2001),
- stabilisations des facteurs cardio-vasculaires (Gotshall et coll., 1996).

De plus, les différences de cadence ne permettent pas de distinguer les sujets par rapport à leur passé cycliste, à leur expérience et à leur niveau (Marsh et coll., 2000) et les sujets cyclistes loisirs sont plus adaptés à des cadences faibles (à puissance identique), car celles-ci sont plus économiques (Mc Naughton et Thomas, 1996). Or, notre population est composée de sujets cyclistes de compétition. Ainsi, notre choix s'est porté sur une cadence de 90 rpm qui semble être naturellement préférée par les cyclistes de haut niveau.

### **1.5. Chaîne d'analyse des gaz expirés**

L'étude de la littérature montre que tous les sujets ont été étudiés par la méthode du cycle par cycle. Les différentes chaînes sont :

- 2 études sur Beckman (Pedersen et coll., 2002 ; Londeree et coll., 1997),
- 2 études sur CPX Med Graphics (Perez et coll., 2003 ; Lucia et coll., 2002c),
- 2 études sur Perkin-Elmer (Scheuermann et coll., 2002 ; Koga 2001)
- 2 études sur Oxycon Champion (Zoladz et coll., 1998a ; Zoladz et coll., 1998c),
- 2 études sur Sensor Medics (Grassi et coll., 2003 ; Lucia et coll., 2002b),
- 2 études sur Oxycon (Pringle et coll., 2003 ; Zoladz et coll., 1998b),

- 1 étude sur QMC Quinton (Buck et Mc Naughton, 1999),
- 1 étude sur Case QP 9000 (Carter et coll., 2000),
- 1 étude sur Morgan Medical (Delorey et coll., 2003),

Pour l'étude des paramètres le choix s'est porté sur le CPX<sup>®</sup> Medgraphics<sup>®</sup>

Les résultats des études cycle par cycle s'expriment sous la forme d'un nuage de point à partir duquel il faut réaliser un lissage et un moyennage. Or, trop d'information nuit à l'information, et l'on pourrait tout autant effectuer des études avec des techniques plus classiques telles que le sac de Douglas (Pedersen et coll., 2002) ou les chambres de mélange (qui présentent une moyenne toutes les 30 secondes). Par ailleurs, les capillaires utilisés pour amener les gaz expirés au niveau des analyseurs rapides (d'O<sub>2</sub> et de CO<sub>2</sub>) sont extrêmement fins. Or, les gaz expirés sont chauds et saturés en vapeur d'eau, et susceptibles de se condenser dans les capillaires, majorant le lag-time. Ceci peut nuire à la précision et à l'exactitude des mesures.

D'autre part, l'analyse des données de la ventilation qui utilisées dans les équations mesurant la consommation d'oxygène et le rejet de CO<sub>2</sub> ne sont pas superposables de part la technique de mesure (pneumotachographe). De plus, la calibration avec une seringue de 3 litres ne présume en rien des résultats pour des débits de plus de 130 l.min<sup>-1</sup>.

## 2. ETUDE CRITIQUE DU CARACTERE MAXIMAL DES EPREUVES D'EFFORT

Howley et coll. en 1995 ont effectué et proposé une revue de la littérature sur les critères définissant le caractère maximal d'un test d'effort. En complément des valeurs maximales obtenues lors de l'atteinte d'un plateau ou d'un pic de  $VO_2$ , différents indices ont été retenus comme pertinents :

- une lactatémie supérieure à  $8 \text{ mmol.l}^{-1}$  (mM),
- un quotient respiratoire (R) compris entre 1,00 et 1,13,
- une FC maximale comprise dans la fourchette de plus ou moins 10 pulsations à partir de la valeur théorique  $220 - \text{âge}$  (proposée par Astrand et Rodahl, 1994).

Si l'atteinte d'un seul de ces indices est suffisante pour certains auteurs, d'autres se montrent plus exigeants. Dans notre étude, les paramètres physiologiques observés à  $VO_{2\text{max}}$  (Cf. tableau 6) montrent une lactatémie de  $9,8 (\pm 2,5)$  mM, un quotient respiratoire (R) de  $1,09 (\pm 0,1)$  et une FC de  $192,1 (\pm 8,8)$  bpm qui se situe dans la fourchette, puisque l'âge moyen des sujets est de 21 ans (soit  $FC_{\text{max}} \text{ théorique} = 220 - 21 = 199$ , et une fourchette allant de 189 à 209). Notre test réunit donc bien tous les critères exigibles pour caractériser un test maximal.

### 3. ETUDE CRITIQUE DES RESULTATS DE NOTRE ETUDE

#### 3.1. Approche statique

L'approche statique correspond à l'analyse de l'ensemble des paramètres physiologiques enregistrés au cours du test d'effort, c'est-à-dire la puissance, la consommation d'oxygène, le rejet de CO<sub>2</sub>, la fréquence cardiaque et la lactatémie. Cette analyse ne prend pas en compte l'évolution de la cinétique de l'oxygène.

##### 3.1.1. Existe-t-il des différences entre les paramètres physiologiques maximaux, en fonction des différents échantillons de l'étude ?

L'ensemble des paramètres physiologiques maximaux enregistrés montre des différences en fonction des échantillons. Ainsi, entre les groupes d'âge, tous les paramètres maximaux sont différents, sauf pour la fréquence cardiaque maximale (FCmax). Cela remet en cause l'utilisation de la FC, en valeur absolue comme étant l'équivalent de la dépense énergétique exprimée en consommation d'oxygène ou en puissance. Cette constatation limite la portée des équations simplifiées considérant la FCmax théorique en fonction de l'âge, comme celles de Astrand et Rodhal (1994), Hsi et coll. (1998) et Inbar et coll. (1994). Ceci a été confirmé par Palmer et coll. (1999) chez des cyclistes.

Concernant le niveau de pratique (Nationaux ou Régionaux) les paramètres sont également différents. La puissance maximale (Pmax), la consommation maximale d'oxygène (VO<sub>2</sub>max) et le rejet maximal de CO<sub>2</sub> (VCO<sub>2</sub>max) sont supérieurs pour les nationaux, alors que la FCmax et la lactatémie maximale ([La]smax) sont supérieures pour les régionaux. Ces différences montrent que les trois premiers paramètres Pmax, VO<sub>2</sub>max et VCO<sub>2</sub>max sont

discriminants pour caractériser le haut niveau. Par contre, la FCmax et la [La]smax apparaissent comme des faux témoins, car plus aléatoires et d'interprétation plus difficile. En effet, comme l'adaptation à haut niveau en cyclisme est liée aux facteurs aérobie (Hawley et Stepto, 2001), une faible lactatémie maximale et une faible FCmax, à l'issue d'un test maximal, peuvent être en faveur d'une amélioration des processus aérobie. On sait que l'entraînement entraîne une adaptation du volume d'éjection systolique, ce qui justifie une FC moins importante. Quant à la lactatémie, témoin de l'implication anaérobie lactique (Medbo et Toska, 2001), les valeurs inférieures des nationaux supposent qu'ils sont moins adaptés en terme anaérobie lactique. Le haut niveau entraînerait une hyperadaptation des facteurs aérobie et une moindre sollicitation des facteurs anaérobie lactiques. Cependant, une fatigue excessive entraîne une moindre augmentation de la FC à l'effort, peut être due à une saturation des récepteurs adrénergiques (Medelli, 2000) et une moindre production d'acide lactique peut être due à une déplétion en glycogène musculaire.

En ce qui concerne les différences entre période de compétition et hors compétition, seule la consommation maximale d'oxygène est significativement différente (respectivement,  $4,4 \pm 0,5$  vs  $4,1 \pm 0,5$ ). Ceci est en accord avec les propos de Faria et coll. (2005) pour qui la consommation d'oxygène varie au cours d'une saison et est le reflet de l'état de forme chez le cycliste. Ceci est en contradiction avec les études de Barbeau et coll. (1993) ou de Rietjens et coll. (2001) qui ont montré que  $VO_2$ max ne varie pas au cours d'une saison de compétition. Il est à signaler que peu d'études s'intéressent de manière objective aux variations entre la saison « creuse » et la saison « pleine ». Nos résultats suggèrent l'implication des facteurs enzymatiques dans l'amélioration ou la régression de  $VO_2$ , plus que les facteurs cardio-vasculaires qui ne sont pas modifiés. On peut penser à une augmentation du pool des fibres dite IIa comme ont pu le montrer la réalisation de biopsies musculaires après entraînement aérobie (Lucia et coll., 2002c).

On observe une différence significative pour la puissance maximale entre les VTT et les routiers (respectivement,  $390,4 \pm 28,2$  W vs  $354,4 \pm 49,7$  W). La supériorité des VTT pourrait s'expliquer par l'intensité observée lors de leurs entraînements et compétitions, en moyenne bien supérieure à celle observée sur les épreuves sur route (Impellizzeri et coll., 2002 ; Berry et coll., 2000).

### 3.1.2. Existe-t-il des différences entre les paramètres physiologiques au seuil anaérobie, en fonction des différents échantillons de l'étude ?

Nous avons choisi arbitrairement le seuil anaérobie pour une lactatémie de 4 mM. A cette intensité, les paramètres physiologiques représentés par la puissance, la consommation d'oxygène et le rejet de CO<sub>2</sub> sont inférieurs :

- pour le groupe d'âge des 15-17 ans par rapport aux deux autres,
- pour les Régionaux par rapport aux Nationaux,
- entre les deux moments de la saison (hors compétition et pendant la compétition).

Par contre, il n'existe aucune autre différence concernant les valeurs de FC.

Les valeurs de Gross Efficiency (GE) correspondent au rendement musculaire brut. Elles se situent généralement entre 21 et 22 %. Pour Mc Daniel et coll. (2002), la GE est inférieure pour les cadences les plus faibles. En ce qui concerne la GE, le groupe des jeunes (15-17 ans) présente la valeur la plus faible (17 %) et le groupe des hauts niveaux (Nationaux) possède la valeur la plus élevée (23 %), alors que les tests sont effectués à la même cadence. La somme des résultats que sont les valeurs de VO<sub>2</sub>max (indice d'efficacité cardio-vasculaire) et la GE (indice d'efficacité musculaire) suggère de l'importance du travail spécifique en terme de quantité (volume d'entraînement, années de pratique) et de qualité (technique gestuelle) pour devenir plus performant.

### 3.1.3. Quels sont les paramètres de notre modèle qui pourraient suffire à caractériser l'épreuve d'effort ?

L'étude des corrélations a confirmé le lien très étroit de quelques paramètres comme  $VCO_2max$  et  $VO_2max$  (.87) et  $VCO_2seuil$  et  $VO_2seuil$  (.97). Ces résultats montrent que l'on pourrait se contenter de la mesure de la consommation d'oxygène, dans la mesure où elle est fortement corrélée au rejet de  $CO_2$ .

Cependant, ces deux paramètres sont nécessaires pour valider le QR (rapport de  $VCO_2$  sur  $VO_2$ ) qui est l'un des critères exigibles pour qualifier l'épreuve de maximale.

Par ailleurs, malgré le choix arbitraire du seuil anaérobie à une lactatémie de 4 mM, l'importance du niveau de corrélation entre  $VO_2seuil$  et  $VCO_2seuil$  témoigne de la qualité du protocole utilisé.

De même, en l'absence d'analyse des gaz, on pourrait se contenter de la mesure la puissance puisque  $Pmax$  est fortement corrélée avec  $VO_2max$  (.70),  $VCO_2seuil$  (.66) et  $VO_2seuil$  (.65) et que  $Pseuil$  est fortement corrélée à  $VO_2max$  (.60),  $VCO_2seuil$  (.85) et  $VO_2seuil$  (.85), et que  $Pmax$  et  $Pseuil$  sont fortement corrélés (.71).

Néanmoins, la prédiction est limitée et imparfaite et justifie le couplage avec l'analyse des gaz expirés.

Dans notre modèle la FC a de faibles corrélations avec les différents paramètres ce qui confirme le faible niveau de prédiction de  $FCmax$ . Par ailleurs, la littérature montre l'inconsistance de la  $FCmax$  comme critère de prédiction de l'intensité de l'exercice. En effet :

- Coats et coll. (2003) montrent que les sujets atteignent  $FCmax$  alors qu'ils sont à environ 90% de  $VO_2max$ ,

- Medelli et coll., (1993) montrent que les valeurs de ventilation, de FC et de  $VO_2$  dépendent de l'intensité de l'exercice en dessous et au dessus du seuil et que les variations de ventilation et de  $VO_2$  ne s'accompagnent pas obligatoirement d'une modification de FC,

- Scheuermann et coll. (2002) montrent que la FC de base n'est pas différente entre les sujets âgés (65 ans) et les jeunes (26 ans),

- Bearden et Moffatt (2001) montrent que la cinétique de la FC est différente de la cinétique de l' $O_2$  ce qui rend incomparable ces deux valeurs,

- Coats et coll. (2003) qui montrent que la récupération est dépendante de l'intensité de l'effort préalable, alors que la puissance a déjà chutée.

La valeur des équations considérant la FCmax théorique en fonction de l'âge, comme celles de Astrand et Rodhal (1994), Hsi et coll. (1998) et Inbar et coll. (1994) sont donc trop peu précises et sont insuffisantes pour déterminer une charge d'entraînement et apprécier l'aptitude des sujets. Ces équations présentent seulement une valeur indicative et descriptive.

L'ensemble de l'analyse des données permet de conclure que :

- la consommation d'oxygène et la puissance sont des facteurs importants à connaître pour l'organisation de l'entraînement et l'évaluation des sujets,

- la lactatémie et la FC sont de faux témoins d'une implication aérobie.

### **3.2. Approche dynamique**

Cet aspect de l'étude correspond à la cinétique de l'oxygène. Pour ce faire, nous avons réalisé des droites de régression à partir des données enregistrées aux différents paliers, avant et après le seuil anaérobie défini, dans notre protocole, comme étant le seuil à 4 mM de lactatémie.

### 3.2.1. Etude critique des pentes de régression avant et après le seuil

L'étude de la littérature montre que, la  $\dot{V}O_2$  présente un  $\dot{V}O_{2max}$  après le seuil (Buck et Mc Naughton, 1999 ; Carter et coll., 2000 ; Delorey et coll., 2003 ; Grassi et coll., 2003 ; Koga et coll., 2001 ; Londeree et coll., 1997 ; Lucia et coll., 2002b ; Pedersen et coll., 2002 ; Pringle et coll., 2003 ; Scheuermann et coll., 2002 ; Zoladz et coll., 1998a ; Zoladz et coll., 1998b ; Zoladz et coll., 1998c). Pourtant, deux auteurs Perez et coll. (2003) et Lucia et coll. (2002c) montrent un  $\dot{V}O_{2max}$ , à l'instar de nos résultats.

Dans notre étude, la première pente, avant le seuil (« pente avant ») est de  $1,057 (\pm 0,117)$  et la distribution des valeurs correspondantes obéit à la loi normale. La deuxième pente, après le seuil (« pente après ») est de  $0,800 (\pm 0,305)$  mais la distribution des valeurs correspondantes n'obéit pas à cette loi. De plus, les pentes et les  $R^2$  sont significativement différents ( $p < .05$ ) et il n'existe aucune corrélation entre les deux pentes. Ainsi, la  $\dot{V}O_2$  apparaît plus élevée avant le seuil par rapport à après. En effet, chez tous nos sujets la pente s'infléchit après le seuil (Cf. figure 15). Il semble donc exister une consommation d'oxygène diminuée par rapport à ce que l'on pouvait attendre en théorie, par extrapolation de la cinétique de l'oxygène avant le seuil.

Cette différence significative ( $p < .001$ ) des pentes avant le seuil et après le seuil est observée quel que soit l'âge, la spécialité, le niveau ou le moment de la saison.

Plusieurs auteurs ont montré que la relation entre la consommation d'oxygène et la puissance est linéaire avant 50% de  $\dot{V}O_{2max}$  (considéré comme l'équivalent du seuil anaérobie par Pedersen et coll., 2002), ou jusqu'au seuil ventilatoire (Lucia et coll., 2002c). Ensuite, à haute intensité, cette linéarité n'existe plus (Pedersen et coll. (2002) et la relation peut même être considérée comme curvilinéaire (Lucia et coll., 2002c).

Ce décalage pour un exercice de haute intensité pourrait refléter la mauvaise perfusion musculaire (Koga et coll., 1999) alors que la quantité d' $O_2$  n'est pas limitée au début de

l'effort pour le muscle (Tordi et coll., 2003). Or, la perfusion peut être améliorable par les exercices en endurance aérobie. De plus, Carter et coll. (2000) montrent que les hautes pressions intramusculaires, aux intensités supérieures au seuil, peuvent réduire la perfusion et le flux sanguin au niveau du quadriceps. Quant à la participation des fII à haute intensité, elle est confirmée par Perez et coll. (2003) mais reste probablement très individuelle et liée à l'entraînement.

Nos résultats concernant la  $\dot{V}O_2$  sont en opposition avec les résultats de Pedersen et coll. (2002) et de Sagiv et coll. (1991) qui précisent qu'à haute intensité on observe une mise en jeu parasite de masses musculaires non impliquées dans la gestuelle cycliste, et qui devraient augmenter la consommation d'oxygène. Par ailleurs, selon Koga et coll. (2001) la masse recrutée agit sur la  $\dot{V}O_2$  pour des intensités se situant avant le seuil ventilatoire.

En outre, il ne faut pas négliger l'apport énergétique d'origine lactique, et là encore les résultats de notre étude sont en contradiction avec Calbet et coll. (2003) pour qui le déficit d' $O_2$  au début de l'exercice est une surestimation de l'apport anaérobie et une sous estimation de la consommation d'oxygène réelle. Ce qui signifierait qu'il existe une différence entre la perfusion musculaire, la disponibilité oxydative musculaire et la mesure des gaz expirés.

Les différences observées entre les seuils pourraient être liées à des aspects :

Cellulaires :

- dans le transport des lactates grâce aux « monocarboxylate transporter » ou MCT (Juel et Pilegaard, 1998),
- dans l'activité mitochondriale plus importante et plus adaptée (Grassi et coll., 2003),

Musculaires :

- dans la perfusion (Tordi et coll., 2003),

- dans la capacité de micro perfusion et de micro vascularisation (DeLorey et coll., 2003),

Energétiques :

- dans le potentiel anaérobie (Calbet et coll., 2003).

Ainsi, nos résultats pourraient s'expliquer par une meilleure adaptation chez nos sujets nationaux à l'instar des résultats de Lucia et coll. (2002c) qui observent une  $\dot{V}_{O_2}$  chez des cyclistes professionnels. Or, tous les sujets de l'étude présentent le même profil que se soit en fonction de l'âge (15-17 ans, 18-22 ans, >22 ans), du niveau (Nationaux, Régionaux), de la spécialité (VTT, Route) ou du moment où ont été effectués les tests (ON : en saison de compétition, OFF : hors saison de compétition).

Tous nos sujets présentent le même profil et l' $\dot{V}_{O_2}$  est en opposition avec les données de la littérature. En effet, celles-ci présentent des  $\dot{V}_{O_2}$ , c'est-à-dire une surconsommation d'oxygène au-delà du seuil.

En dépit des conclusions de Lucia et coll. (2002c) à l'issue d'une étude chez des cyclistes professionnels, il apparaît que le niveau de compétition n'est pas le seul facteur influençant la  $\dot{V}_{O_2}$  après le seuil. Dans la mesure où nos sujets pratiquent le cyclisme depuis plusieurs années et que l'on observe des différences de consommation d'oxygène en fonction des âges ; l'influence de l'âge apparaît plus probablement lié à la quantité d'entraînement effectué, comme l'ont présenté divers auteurs (Hawley et Stepto, 2001 ; Green et coll., 2000 ; Hepple et coll., 1999). Il semble que la quantité et l'intensité de l'entraînement agissent sur la  $\dot{V}_{O_2}$  avant le seuil et fassent intervenir les fII plus tardivement. En effet, ces dernières, moins efficaces, sont davantage recrutées quand l'intensité augmente. Elles entraîneraient une non

linéarité de la relation  $P/VO_2$ , car elles consomment plus d'oxygène que la fibre de type 1 (fI) (Londree et coll., 1997).

Les dernières études de la littérature s'appuient d'ailleurs sur cette surconsommation d'oxygène pour justifier d'une moindre efficacité musculaire après le seuil (prioritairement due au recrutement plus massif des fII). Cette distribution des fibres aurait, de plus, une grande influence sur la composante lente (Lucia et coll., 2002c). D'autant que Bearden et Moffatt (2001) montrent qu'il existe deux types de réponse avant et après le seuil (ventilatoire pour eux), ce qui les conduit à supposer que les facteurs limitant l'effort diffèrent suivant l'intensité. Parmi ces facteurs, le gradient de concentration du potassium, qui est en relation directe avec la fatigue, induirait un nouveau recrutement musculaire.

En opposition formelle avec cette théorie, Lucia et coll. (2002c) chez des cyclistes professionnels et Perez et coll. (2003) chez des sujets sains montrent une  $\text{incessO}_2$ . Ces deux études parlent d'efficacité musculaire ce que nos résultats confirment.

Cependant, ces deux études sont réalisées avec un analyseur CPX® Medgraphics® identique au notre. Or, comme le suggère Jeukendrup (2002) les différences entre l' $\text{incessO}_2$  et l' $\text{excessO}_2$  pourraient être liées à ce type de matériel. Et en effet, si l'on considère la notice technique de ce matériel, les concepteurs annoncent une erreur possible, probablement par une augmentation du lag-time, de la mesure de la consommation d'oxygène, de l'ordre de 12,1 %, si aucun facteur correctif n'est appliqué pour le calcul des données. Ainsi, cette erreur pourrait donc entraîner un  $\text{incessO}_2$  au lieu d'une  $\text{excessO}_2$ .

En dehors de cette réserve liée au matériel, la  $\text{cinO}_2$  pourrait être la résultante de notre protocole, dans la mesure où l'analyse de la littérature montre que le choix des études s'effectue avec le seuil ventilatoire. Comme notre choix de seuil est lié à une lactatémie de 4 mM, nous avons réalisé une deuxième étude concernant la  $\text{cinO}_2$  avec le seuil ventilatoire comme point de référence. Les résultats sont strictement identiques.

### 3.2.2. Quel est l'intérêt de l'étude des pentes ?

Chez toutes nos populations il existe des différences significatives entre les pentes avant et après le seuil. Mais si ce les auteurs sont en accord sur l'existence de la rupture de pente, l'interprétation qui en est donnée peut diverger. Ainsi, Lucia et coll. (2002c) estiment que les cyclistes élites recrutent une masse musculaire inférieure pour des intensités modérées (avant le seuil), alors que Hoogeveen (2000) montre que les sujets entraînés ont une efficacité supérieure, donc un coût énergétique inférieur.

Dans notre étude, il existe une différence significative ( $p < .001$ ) pour les pentes avant seulement entre les Régionaux et les Nationaux (respectivement,  $1,08 \pm 0,12$  vs  $1,03 \pm 0,11$ ). A faible puissance, les Régionaux consomment plus d'oxygène, ce qui les rend moins économiques. Or, comme la consommation d'oxygène est, entre autre, liée fortement à l'utilisation des acides gras libres (AGL) on pouvait s'attendre à une pente supérieure chez les Nationaux. De même, la « gross efficiency » (GE) est supérieure chez les Nationaux (23 %) par rapport aux Régionaux (20 %) et il semble bien que ce soit l'efficacité musculaire qui avantage les Nationaux.

Pour les pentes après, notre étude montre qu'il existe une différence seulement entre les Routier et les VTT (respectivement  $0,82 \pm 0,31$  vs  $0,65 \pm 0,25$ ). Comme l'intensité de l'exercice lors de la pratique VTT est en moyenne supérieure à celle des Routier (Impellizzeri et coll., 2002) et que la qualité anaérobie est considérée comme importante (Baron, 2001), on peut supposer que ces derniers utilisent plus leur fII. Ainsi, les Routiers doivent présenter une meilleure efficacité motrice et une plus grande capacité d'utilisation des fI. Ceci est en accord avec les résultats de Hawley et Stepto, (2001) qui montrent que ces adaptations sont liées au volume et à l'intensité de la pratique au cours de la carrière cycliste, et avec ceux de Perrey et

Candaux (2002) qui observent que la réduction de la pente est liée à l'entraînement en endurance. Parallèlement, l'endurance est très liée à une capillarisation musculaire et à une dominante de FI chez les cyclistes (Green et coll., 2000).

De plus, le recrutement des masses musculaires externe au pédalage pourrait être plus ou moins important, en fonction de la qualité de la technique individuelle de pédalage.

Il apparaît donc que les pentes avant le seuil reflètent le niveau de pratique aérobie des sujets. Dans notre étude, il n'existe aucune différence entre les âges et entre le moment où est passé le test (*i.e.* hors compétition et en compétition), ce qui pourrait nuancer l'interprétation précédente. En effet, seules les différences observées entre les Nationaux et les Régionaux permettent de confirmer ces données, à l'instar de Lucia et coll. (2002c) qui définissent le haut niveau comme l'un des éléments liés à la pente.

En définitive, les pentes permettent de distinguer Nationaux et Régionaux avant le seuil, et VTT et Routier après le seuil. Néanmoins, elles ne donnent aucune indication sur l'état d'entraînement hors compétition et en compétition.

### 3.2.3. Quel est l'intérêt de l'étude des intercepts ?

Selon la définition de Mc Daniel et coll. (2002), l'intercept est témoin de la dépense énergétique théorique des membres à charge nulle. Dans notre étude l'intercept avant le seuil est inférieur à l'intercept après le seuil. De plus, l'intercept avant le seuil est inférieur ( $p < .05$ ) chez les plus âgés par rapport aux deux autres groupes (pour les  $0,72 \pm 0,20$  pour les G15-17 ;  $0,74 \pm 0,15$  pour les G18-22 ;  $0,64 \pm 0,17$  pour les G>22), ainsi que pour les Nationaux par rapport aux Régionaux (respectivement  $0,65 \pm 0,18$  vs  $0,73 \pm 0,17$ ). Ces résultats sont cohérents avec l'étude des pentes et montrent que les sujets les plus entraînés ou pratiquant le cyclisme depuis le plus grand nombre d'années sont plus efficaces.

Quant à l'intercept après le seuil, aucune différence n'apparaît entre les différents groupes. Cela signifie que, après le seuil, la réponse serait toujours identique quelque soit le type de population. Il existerait donc une adaptation différente avant et après le seuil, en accord avec les propositions de Bearden et Moffatt (2001).

### ***3.3. Est-il possible d'effectuer une modélisation ?***

A partir de nos résultats est-il possible d'obtenir une modélisation utilisable sur le terrain, permettant de discriminer nos différentes populations cyclistes ? Nos résultats montrent que la pente et l'intercept « avant » sont discriminants du niveau et que la « pente après » est discriminante de la spécialité. Cependant, n'y aurait-il pas des facteurs qui pourraient biaiser notre étude ?

#### **3.3.1. Recherche des facteurs de biais**

Dans notre étude l'âge est apparu comme un facteur de biais dans la relation entre pentes et niveau ou spécialité. Cependant, en ce qui concerne le niveau, l'âge n'interfère pas directement sur la « pente après ».

Ces résultats sont en accord avec les études de Vicente-Rodriguez et coll. (2003), Morgan et coll. (2002), Cleuziou et coll. (2002), Duché et coll. (2001) et Fukuba et coll. (1999) qui montrent aucune incidence de l'âge sur la  $\dot{V}O_2$  quelle que soit l'intensité observée. Cependant, dans la mesure où nous avons trouvé un effet indirect de l'âge sur le niveau et la spécialité, ces résultats concordent avec l'étude de El Haraoui et coll. (1995) qui montre que l'endurance aérobie augmente avec l'âge.

### 3.3.2. Intérêt de la puissance et recherche d'équations de prédiction spécifique de la population cycliste

Le rôle de la puissance est mis en avant par Londeree et coll. (1997) qui présentent « la puissance comme le facteur le plus important de prédiction de la consommation d'oxygène, avec un coefficient de corrélation de  $r = 0,97$  ( $p < .0001$ ) ».

A partir de ces constatations nous avons tenté d'utiliser ce facteur pour établir des équations de prédiction spécifique à la population étudiée. De notre étude, il ressort l'équation suivante :

$$P_{\max} = 0,85 \text{ VO}_2\max + 0,77 \text{ VCO}_2 \text{ seuil} + 0,33 \text{ âge} - 0,39 \text{ VCO}_2\max - 0,62 \text{ VO}_2 \text{ seuil} + 37,9, R^2 \text{ de } 0,66.$$

Cette équation explique 66 % de la valeur de la puissance, ce qui veut dire qu'elle explique les 2/3 de la variance de la puissance, et qu'il reste 1/3 non expliqué ce qui diffère des résultats d'autres auteurs (Loudon et coll., 1998). Cette équation indique que  $\text{VO}_2\max$  est certes le facteurs le plus important (0,85), à l'instar des propos des Londeree et coll. (1997), mais que la seule connaissance de la  $P_{\max}$  n'est qu'un reflet imparfait de la consommation maximale d'oxygène (et inversement). Par ailleurs, si l'on enlève de cette équation les facteurs maximaux ( $\text{VO}_2\max$  et  $\text{VCO}_2\max$ ), comme on peut l'observer lors des tests indirect de détermination de  $\text{VO}_2\max$  ou les tests s'arrêtant au seuil à 4 mM, le  $R^2$  chute à 0,55. Or, ces données maximale ne sont enregistrable qu'au cours de test d'effort maximaux, ce qui signifie que les tests extrapolant les résultats sont peu fiables pour l'organisation et la contrôle de l'entraînement.

Enfin, en utilisant uniquement l'âge comme facteur explicatif de la puissance, sans réalisation de test d'effort, l'équation devient :

$$P_{\max} = 245,38 + 5,40 \text{ âge}, R^2 = 0,27.$$

Ces résultats démontrent la nécessité de réaliser un test maximal avec analyse des gaz expirés, afin d'avoir une approche plus précise de la capacité des sujets.

### 3.3.3. Quel est l'intérêt d'utiliser $\Delta$ slope ?

Le  $\Delta$ slope correspond à la différence entre la pente après et la pente avant le seuil. Il est à noter qu'une « pente après » supérieure à une « pente avant » correspond à un excess $O_2$ , alors qu'une « pente après » inférieure correspond à un incess $O_2$ . Ainsi, pour le  $\Delta$ slope (pente après – pente avant) :

- si la valeur est positive, on a un excess $O_2$ ,
- si la valeur est nulle, on a une linéarité parfaite,
- si la valeur est négative, on a un incess $O_2$ .

Dans notre étude, le  $\Delta$ slope moyen est de :  $0,80 - 1,06 = - 0,26$ , ce qui met en évidence un incess $O_2$ . Les corrélations entre le  $\Delta$ slope et les paramètres physiologiques enregistrés ( $P_{max}$ ,  $L_{max}$ ,  $FC_{max}$  et  $FC_{seuil}$ ) sont toutes négatives. Cela signifie que plus ces paramètres augmentent et plus  $\Delta$ slope diminue, c'est-à-dire plus l'incess $O_2$  augmente.

Le  $\Delta$ slope correspond t'il aux capacités d'endurance aérobie ou est-il le reflet d'un facteur limitant l'augmentation de la consommation d'oxygène ?

Pour la  $FC_{max}$  ou la  $FC_{seuil}$ , leur augmentation correspondrait à une consommation d'oxygène qui ralentit ou stagne. Cela est cohérent puisque la FC est le reflet d'un effort aérobie et que ce paramètre s'abaisse quand les sujets sont endurants.

Pour les  $L_{max}$  les résultats et les conclusions seraient les mêmes, puisqu'il s'agit ici du reflet de la participation anaérobie.

Il en serait de même pour les  $P_{max}$ , les sujets les plus forts en terme de potentiel anaérobie étant ceux qui développent les puissances les plus élevées.

Le  $\Delta$ slope apparaîtrait donc comme le reflet de la participation anaérobie (ou résistance), montrant la limite du système aérobie. Il serait le reflet indirect de l'endurance aérobie des sujets. Ainsi, le palier où apparaît cet indice nous renseignerait sur la limite maximale de stabilité aérobie des sujets. Le sujet le plus endurant devrait donc présenter une rupture de linéarité de  $\dot{V}O_2$  plus tardive. Ceci qui correspond aux considérations de Lucia et coll. (2002c) qui prennent en compte l'efficacité motrice, c'est-à-dire une consommation d'oxygène moindre pour un même effort. Par contre, une  $\dot{V}O_2$  ralentie pourrait entraîner des niveaux de consommation d'oxygène maximale moindres ; or celle-ci est considérée par divers auteurs comme le reflet de l'endurance (Iaiche et coll., 1996). Cet aspect réclame une étude prospective.

# CONCLUSION

Nos résultats se présentent sous deux aspects. Une approche, que l'on peut nommer « statique », concernant les valeurs des paramètres physiologiques enregistrés au cours d'un test d'effort et une approche que l'on peut nommer « dynamique » concernant l'évolution de la cinétique de la consommation d'oxygène. Les résultats sont donc :

- Le groupe G15-17 est différents significativement ( $p < .001$ ) pour les paramètres Pmax,  $VO_2$ max,  $VCO_2$ max et Lamax. Par contre, la FCmax n'est pas différente entre les trois groupes,
- Le G>22 présente une La max inférieures aux deux autres groupes,
- Les VTT ont une Pmax supérieure à celle des Routiers ( $354,4 \pm 49,7$  vs  $390,4 \pm 28,2$  W),
- Les Nationaux présentent des valeurs plus élevées de Pmax ( $391,1 \pm 37,5$  vs  $337,4 \pm 43,7$  W),  $VO_2$  max ( $4,8 \pm 0,5$  vs  $4,0 \pm 0,5$  l.min<sup>-1</sup>) et  $VCO_2$  max ( $4,8 \pm 0,5$  vs  $4,4 \pm 0,7$  l.min<sup>-1</sup>),
- Les régionaux présentent une FCmax ( $189,6 \pm 8,2$  vs  $193,7 \pm 8,9$  bpm) et une La max supérieures ( $7,7 \pm 2,1$  vs  $10,8 \pm 2,3$  mmol.l<sup>-1</sup>),
- $VO_2$  max est supérieur chez les ON par rapport aux OFF ( $4,4 \pm 0,5$  vs  $4,1 \pm 0,5$  l.min<sup>-1</sup>),
- Le G15-17 présente les valeurs plus faibles pour P seuil ( $228,5 \pm 42,3$  W),  $VCO_2$  seuil ( $3,3 \pm 0,5$  l.min<sup>-1</sup>) et  $VO_2$  seuil ( $3,2 \pm 0,5$  l.min<sup>-1</sup>),
- Les Nationaux présentent des P seuil supérieures ( $307,9 \pm 30,7$  vs  $236,9 \pm 45,5$  W),  $VCO_2$  ( $3,9 \pm 0,5$  vs  $3,3 \pm 0,5$  l.min<sup>-1</sup>) et des  $VO_2$  seuil supérieures ( $3,8 \pm 0,5$  vs  $3,3 \pm 0,5$  l.min<sup>-1</sup>), aux Régionaux,
- Les ON présentent des valeurs supérieures pour les paramètres P seuil ( $281,6 \pm 40,5$  vs  $258,6 \pm 56,6$  W),  $VCO_2$  seuil ( $3,8 \pm 0,5$  vs  $3,4 \pm 0,6$  l.min<sup>-1</sup>) et  $VO_2$  seuil ( $3,7 \pm 0,5$  vs  $3,4 \pm 0,6$  l.min<sup>-1</sup>),
- Le G15-17 montre la GE la plus faible (17 %) et les Nationaux la plus forte (22 %),

- La cinétique de l'oxygène est linéaire jusqu'au seuil est présente une déflexion après le seuil,
  - Pour les trois groupes d'âge, les pentes avant et après le seuil sont différentes,
  - La « pente après » est inférieure chez les VTT par rapport aux Routiers,
  - L' « intercept avant » est inférieur chez les NAT par rapport aux Régionaux,
  - Les « intercepts avant » et les « pentes avant » sont discriminants du niveau,
  - La « pente après » est discriminante de la spécialité
  - L'âge interfère indirectement sur la pente avant,
  - L'âge interfère indirectement sur la pente avant pour le niveau,
  - L'âge n'a pas d'effet direct sur l' « intercept avant » pour le niveau,
  - L'âge n'influence pas la « pente après », en ce qui concerne la spécialité,
  - P seuil : influence l'effet du niveau sur la « pente avant »,
  - P max présente un effet sur la spécialité pour la « pente après »,
  - l'équation de prédiction avec les paramètres maximaux est :  $P_{max} = 0,850 VO_{2max} + 0,334 \text{ âge} + 0,774 VCO_{2 \text{ seuil}} - 0,387 VCO_{2max} - 0,622 VO_{2 \text{ seuil}} + 37,9$ ,  $R^2 = 0,663$ ,
  - l'équation de prédiction sans les paramètres obtenus au cours d'un test d'effort est :  $P_{max} = 45,377 + 5,402 \text{ âge}$ ,  $R^2 = 0,27$ ,
  - Le  $\Delta$ slope présente des corrélations avec FC seuil, La max, P max et FC max,
  - Le remplacement du seuil anaérobie par le seuil ventilatoire offre les mêmes conclusions d'un  $\text{incessO}_2$ ,
  - La qualité du matériel d'analyse des gaz expiré pourrait être en lien avec cet  $\text{incessO}_2$ .
- L'ensemble de nos résultats mène à de nouvelles investigations afin de pouvoir confirmer ou infirmer nos données.

# **BIBLIOGRAPHIE**

1. Ahmad F, Kavey REW, Kveselis DA, Gaum WE, Smith FC (2001) Responses of non-obese white to treadmill exercise, the journal of pediatrics, 139, 2 : 284-90
2. Ahmaidi S, Hardy JM, Varray A, Collomp K, Mercier J, Prefaut C (1992) Relation entre le seuil d'accumulation des lactates et le seuil de l'inadaptation ventilatoire à la production de CO<sub>2</sub> au cours d'une épreuve d'exercice musculaire chez le sportif, Science et sport, 7, 3 : 157-62
3. Amann M, Subudhi A, Foster C (2004) Influence of testing protocol on ventilatory thresholds and cycling performance, Med Sci Sports Exerc, 36 (4) : 613-22
4. Anderson GS, Rhodes EC (1991) Relationship between blood lactate and excess CO<sub>2</sub> in elite cyclists, J Sports Sc, 9, 2 : 173-81
5. Astrand PO et Rodahl K (1994) Manuel de physiologie de l'exercice physique, Paris, Ed Masson, 4<sup>ème</sup> éd
6. Astrand PO, Cuddy TE, Saltin B, Stenberg J (1964) Cardiac output during submaximal and maximal work, J Appl Physiol, 19 : 268-74
7. Astrand PO et Rhyning I (1954) A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during submaximal work, J Appl Physiol, 7 : 218
8. Aunola S et Rusko H (1984) Reproducibility of aerobic and anaerobic thresholds in 20-25 year old men, Eur J appl physiol, 69 : 196-202

9. Bangsbo J, Juel C, Hellsten Y, Saltin B (1997) Dissociation between lactate and proton exchange in muscle during intense exercise in man, *J physiol*, 504, 2 : 489-99
10. Barbeau P, Serresse O, Boulay MR (1993) Using maximal and submaximal aerobic variables to monitor elite cyclists during a season, *Med Sci Sports Exerc*, 25, 9 : 1062-9
11. Baron R (2001) Aerobic and anaerobic power characteristics of off-road cyclists, *Med sci sports exerc*, 33, 8 : 1387-93
12. Bearden SE, Moffatt RJ (2001) VO<sub>2</sub> and heart rate kinetics in cycling : transitions from an elevated baseline, *J Appl Physiol*, 90 : 2081-7
13. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ (1986) A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange, *J of Appl Physiol*, 60, 6 : 2020-7
14. Beneke R (1995) Anaerobic threshold, individual anaerobic threshold, and maximal lactate steady state in rowing, *Med Sci Sports Exerc*, 27, 6 : 863-7
15. Bentley DJ, Wilson GJ, Davie AJ, Zhou (2001) Correlation between peak power output, muscular strength and cycle time trial performance in triathletes, *J Sports Med Phys Fitness*, 38, 3 : 201-7
16. Berthoin S, Blondel N, Billat V, Gerbeaux M (2001) La vitesse à VO<sub>2</sub>max, signification et applications en course à pied, *STAPS*, 54 : 45-61

17. Berry MJ, Koves TR, Benedetto JJ (2000) The influence of speed, grade and mass during simulated off road bicycling, *App Ergonomics*, 31 : 531-6
18. Billat V (1996) Use of blood lactate measurements for prediction of exercise performance and for control of training. Recommendations for long-distance running, *Sports Med*, 22, 3 : 157-75
19. Billat V, Renoux JC, Pinoteau J, Petit B, Koralsztein (1995) Cinétiques des variables cardio-pulmonaires et métaboliques au cours d'épreuves exhaustives (temps limites) à 90, 100 et 105 % de la vitesse maximale aérobie chez 16 coureurs élités, *STAPS*, 37 : 53-61
20. Billat V, Dalmay F, Antonini MT (1994) A method for determining the maximal steady state of blood lactate concentration from two levels of submaximal exercise, *Eur J Appl Physiol*, 69 : 196-202
21. Bisciotti GN, Iodice PP, Arcelli E, Filaire E, Sagnol M (2003) Un test de terrain simple pour la détermination du seuil anaérobie, *Sc & Sports*, 18 : 46-7
22. Bonen A, McCullagh MJA, Putman CT, Hultman E, Jones NL, Heigenhauser GJF (1998) Short-term training increases human muscle MCT1 and femoral venous lactate in relation to muscle lactate, *Am J physiol*, 274, (endocrinol metab 37) : 102-7
23. Bosquet L, Leger L, Legros P (2002), methods to determine aerobic endurance, *Sports Med*, 32, 11 : 675-700

24. Boulay M-R, Simoneau J-A, Lortie G, Bouchard C (1997) Monitoring high-intensity endurance exercise with heart rate and threshold, *Med and Sc in Sports and Exerc*, 29, 1 : 125-32
25. Bourgois J, Coorevits P, Danneels L, Witvrouw E, Cambier D, Vrijens J (2004) Validity of the heart rate deflection point as a predictor of lactate threshold concepts during cycling, *J Strength Cond Res*, 18, 3 : 498-503
26. Buck D et Mc Naughton (1999) Maximal accumulated oxygen deficit must be calculated using 10-min time periods, *Med Sci Sports Exerc*, 31, 9 : 1346-9
27. Calbet AL, De Paz A, Garatachea N, Cabeza De Vaca S, Chavarren J (2003) Anaerobic energy provision does not limit Wingate exercise performance in endurance-trained cyclists, *J Appl Physiol*, 94, 668-76
28. Carter H, Jones AM, Barstow TJ, Burnley M, Williams CA, Doust JH (2000) Oxygen uptake kinetics in treadmill running and cycle ergometry : a comparison, *J Appl Physiol*, 89 : 899-907
29. Cazorla G, Petibois C, Bosquet L, Léger L (2001) Lactate et exercice : mythes et réalités, *STAPS*, 54 : 63-76
30. Chicharro JL, Perez M, Vaquero AF, Lucia A, Legido JC (1997) Lactic threshold vs ventilatory threshold during a ramp test on a cycle ergometer, *J Sports Med Phys Fitness*, 37, 2 : 117-21

31. Chicharro JL, Sanchez O, Bandres F, Vaquero AF, Perez M, Lucia A, Guantes Y, Legido JC (1995) Blood coagulability changes during exercise and its relationship with the anaerobic threshold, *Thrombosis res*, 79, 5/6 : 515-22
32. Cleuziou C, Lecoq AM, Candau R, Courteix D, Guenon P, Obert P (2002) Kinetics of oxygen uptake at the onset of moderate and heavy exercise in trained and untrained prepubertal children, *Science et Sports*, 17 : 291-6
33. Coats EM, Rossiter HB, Day RD, Miura A, Fukuba Y, Whipp BJ (2003) Intensity-dependent tolerance to exercise after attaining VO<sub>2</sub>max in humans, *J Appl Physiol*, 95 : 483-90
34. Conconi F, Grazi G, Casoni I, Guglielmini C, Borsetto C, Ballarin E, Mazzoni G, Patracchini M, Manfredini F (1996) The Conconi test: methodology after 12 years of application, *Int J Sports Med*, 17, 7 : 509-1
35. Conconi F, Ferrari M, Ziglio PG, Droghetti P, Codega L (1982) Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test un runners, *J Appl Physiol*, 54 : 869-73
36. Coyle EF (1995) Integration of the physiological factors determining endurance performance ability, *Exercise & Sport Sciences, Reviews*, 23 : 25-63
37. Delorey DS, Kowalchuk JM, Paterson DH (2003) relationship between pulmonary O<sub>2</sub> uptake kinetics and muscle deoxygenation during moderate-intensity exercise, *J Appl Physiol*, 95: 113-120

38. Denadai BS, Figuera TR, Favaro OR, Goncalves M (2004) Effect of the aerobic capacity on the validity of the anaerobic threshold for determination of the maximal lactate steady state in cycling, *Braz J Med Biol Res*, 37, 10 : 1551-6
39. Dickstein K, Barvik S, Aarsland T, Snapinn S, Karlsson J (1990) A comparison of methodologies in detection of the anaerobic threshold, *Circulation*, 81, 1 (suppl) : 38-46
40. Di Prampero PE et Ferretti (1999) The energetics of anaerobic muscle metabolism : a reappraisal of older and recent concepts, *Resp physiol*, 118 : 103-15
41. Dubouchaud H, Eydoux N, Granier P, Préfaut C, Mercier J (1999) Lactate transport activity in rat skeletal muscle sarcolemmal vesicles after acute exhaustive exercise, *J appl physiol*, 87, 3 : 955-61
42. Duché P, Bedu M, Van Praagh E (2001) Exploration des performances anaérobies de l'enfant. Bilan de 30 ans de recherche, *STAPS*, 54 : 109-30
43. El Haraoui M, Mouaddib M, Portero P, Gamet D, Libert JP, Goubel F (1995) L'enfant à l'exercice : approche pluridisciplinaire, *RBM*, 17, 1 : 41-5
44. Faina M, Billat V, Squadrone R, De Angelis M, Koralsztein JP, Dal Monte A (1995) Anaerobic contribution to the time to exhaustion at the minimal exercise intensity at

which maximal oxygen uptake occurs in elite cyclists, kayakists and swimmers, *Eur J Appl Physiol*, 76, 1 : 13-20

45. Faria EW, Parker DL, Faria IE (2005) The science of cycling : physiology and training – part 1, *Sports Med*, 35, 4 : 285-312
46. Febbraio MA, Carey MF, Snow RJ, Stathis CG, Hargreaves M (1996) Influence of elevated muscle temperature on metabolism during intense, dynamic exercise, *Am J Physiol*, 271, 5 (Pt 2) : 1251-5
47. Fox JEM, Meredith D, Halestrap AP (2000) Characterisation of human monocarboxylate transporter 4 substantiates its role in lactic efflux from skeletal muscle, *J Physiol*, 529, 2 : 285-93
48. Francaux MA, Jacqmin PA, Sturbois XG (1993) The maximum lactate clearance: a new concept to approach the endurance level of an athlete, *Arch Int Physiol Biochim Biophys*, 101, 1 : 57-61
49. Freund H, Oyono-Enguelle S, Heitz A, Marbach J, Ott C, Gartner M (1989) Effect of exercise duration on lactate kinetics after short muscular exercise, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 58, 5 : 534-42
50. Freund H et Zouloumian P (1981) Lactate after exercise in man : I. evolution kinetics in arterial blood, *Eur J Physiol Occup Physiol*, 46, 2 : 121-33

51. Fukuba Y, Haouzi P, Chalon B (1999) Heart rate dynamics during sinusoidal exercise : comparison of the control system between children and adults, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 60 : 35-44
52. Gaskill SE, Ruby BC, Walker AJ, Sanchez OA, Serfass RC, Leon AS (2001) Validity and reliability of combining three methods to determine ventilatory threshold, *Med Sci Sports Exerc*, 33, 11 : 1841-8
53. Gladden LB (2001), Lactic acid : new roles in a new millennium, *PNAS*, 98, 2 : 395-7
54. Gotshall RW, Bauer TA, Fahrner SL (1996) cycling cadence alters exercise hemodynamics, *Int J Sports Med*, 17, 1 : 17-21
55. Grassi B, Pogliaghi S, Rampichini S, Quaresima V, Ferrari M, Marconi C, Cerretelli P (2003) Muscle oxygenation and pulmonary gas exchange kinetics during cycling exercise on-transitions in humans, *J Appl Physiol*, 95 : 149-58
56. Green H, Tupling R, Roy B, O'Toole D, Burnett M, Grant S (2000) Adaptation in skeletal muscle exercise metabolism to a sustained session of heavy intermittent exercise, *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 278 : E118-26
57. Hansen EA, Jorgensen LV, Jensen K, Fregly BJ, Sjogaard G (2002) Crank inertial load affects freely chosen pedal rate during cycling, *J of Biomechanics*, 35 : 277-85

58. Hawley JA et Stepto NK (2001) Adaptations of skeletal muscle to prolonged, intense endurance training, *Clinical and experimental pharmacology and physiology*, 29 : 1-5
59. Hawley JA (2002) Adaptation of skeletal muscle to prolonged, intense endurance training, *Clin Exp Pharmacol Physiol*, 29, 3 : 218-22
60. Hepple RT, Babits TL, Plyley MJ, Goodman JM (1999) Dissociation of peak vascular conductance and VO<sub>2</sub>max among highly trained athletes, *J Appl Physiol*, 87, 4 : 1368-72
61. Hoogeveen AR (2000) The effect of endurance training on the ventilatory response to exercise in elite cyclists, *Eur J Appl Physiol*, 82 : 45-51
62. Howley ET, Bassett DRJr, Welch HG (1995) Criteria for maximal oxygen uptake : review and commentary, *Med Sci Sports Exerc*, 27 (9) : 1292-1301
63. Hug F, Decherchi P, Marqueste T, Jammes (2004) EMG versus oxygen uptake during cycling exercise in trained and untrained subjects, *J Electromyogr Kinesiol*, 14, 2 : 187-95
64. Hsi WL, Lan C et Lai JS (1998) Normal standards for cardiopulmonary responses to exercise using a cycle ergometer test, *J Formos Med Assoc*, 97, 5 ; 315-22.
65. Iaiche R, Toraa M, Friemel F (1996) Evaluation de VO<sub>2</sub>max et de VMA, en laboratoire et sur le terrain, *Sc et Sport*, 11 : 91-5

66. Impellizzeri F, Sassi A, Rodriguez-Alonso M, Mognoni P, Marcora S (2002) Exercise intensity during off-road cycling competitions, *Med Sci Sports Exerc*, 34, 11 : 1808-13
67. Inbar O, Oren A, Scheinowitz M, Rotstein A, Dlin R et Casaburi R (1994) Normal cardiopulmonary responses during incremental exercise in 20- to 70-yr-old men, *Med Sci Sports Exerc*, 26, 5 ; 538- 46
68. Jensen K, Johansen L (1998) Reproducibility and validity of physiological parameters measured in cyclists riding on racing bikes placed on a stationary magnetic brake, *Scand J Med Sci Sports*, 8 : 1-6
69. Jeukendrup A (2002) Are world-class cyclists really more muscular efficient, *Med Sci Sports Exerc*, 1238-9
70. Jones AM, Carter H, Doust JH (1999) A disproportionate increase in VO<sub>2</sub> coincident with lactate threshold during treadmill exercise, *Med Sci Sport Exerc*, 31 : 1299-306
71. Jones AM et Doust JH (1998) The validity of the lactate minimum test for determination of the maximal lactate steady state, *Med & Sc In Sp & Ex*, 30, 8 : 1304-13
72. Juel C et Pilegaard AP (1998) Lactate/H<sup>+</sup> transport kinetics in rat skeletal muscle related to fibre type and changes in transport capacity, *Eur J Physiol*, 436 : 560-4

73. Karlsson J, Sjodin B, Jacobs I, Kaiser P (1981) Relevance of muscle fibre type to fatigue in short intense and prolonged exercise in man, *Ciba Found Symp*, 82 : 59-74
74. Kindermann W, Simon G, Keul J (1979) The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training, *Eur J Appl Physiol*, 42 : 429-35
75. Koga S, Shiojiri T, Shibasaki M, Kondo N, Kukuba Y, Barstow TJ (1999) Kinetics of oxygen uptake during supine and upright heavy exercise, *J Appl Physiol*, 87 : 253-60
76. Koga S, Barstow TJ, Shiojiri T, Takaishi T, Fukuba Y, Kondo N, Shibasaki M, Poole DC (2001) Effect of muscle mass on VO<sub>2</sub> kinetics at the onset of work, *J Appl Physiol*, 90 : 461-8
77. Koike A, Weiler-Ravell D, McKenzie K, Zanonato S et Wasserman K (1990) Evidence that the metabolic acidosis threshold is the anaerobic threshold, *J appl physiol*, 68, 6 : 2521-6
78. Lakomy KA (1986) measurement of work and power output using friction-loaded cycle ergometers, *ergonomics*, 29, 4 : 509-17
79. Lepers R, Millet GY, Maffiuletti NA, Hausswirth et J Brisswalter (2001) Effect of pedalling rates on physiological response during endurance cycling, *Eur J Appl Physiol*, 85 : 392-5

80. Loat CER et Rhodes EC (1996) Comparison of the lactate and ventilatory thresholds during prolonged work., *Biol Sp*, 13, 1 : 3-12
81. Loftin M et Warren B (1994) Comparison of a simulated 16.1-km time trial,  $VO_2$ max and related factors in cyclists with different ventilatory thresholds, *Int J Sports Med*, 15, 8 : 498-503
82. Londeree BR et Ames SA (1975) Maximal steady state versus state of conditioning, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 34, 4 : 269-78
83. Londeree BR, Moffitt-Gernstenberger J, Padfield JA, Lottman D (1997) Oxygen consumption of cycle ergometry is nonliner related to work rate and pedal rate, *Med Sci Sport Exerc*, 29, 6 : 775-80
84. Loudon JK, Cagle PE, Figoni SF, Nau KL, Klein RM (1998) A submaximal all-extremity exercise test to predict maximal oxygen consumption, *Med Sci Sports Exerc*, 30, 8 : 1299-303
85. Lothian F et Farrally MR (1995) A comparison of methods for estimating oxygen uptake during intermittent exercise, *J Sports Sci*, 13, 6 : 491-7
86. Lucia A, Hoyos J, Carvajal A, Chicharro JL (1999) Heart rate response to professional road cycling: the Tour de France, *Int J Sports Med*, 20, 3 : 167-72

87. Lucia A, Hoyos J, Chicharro JL (2001a) Preferred pedalling cadence in professional cycling, *Med sci sports exerc*, 33, 8 : 1361-6
88. Lucia A, Hoyos J, Chicharro JL (2001b) Physiology of professional road cycling, *Sports Med*, 31, 5 : 325-37
89. Lucia A, Hoyos J, Perez M, Santalla A, Chicharro JL (2002a) Inverse relationship between VO<sub>2</sub> and economy/efficiency in world class cyclists, *Med sci sports exerc*, 34 : 2079-84
90. Lucia A, Hoyos J, Santilla A, Perez M, Chicharro J (2002b) Curvilinear VO<sub>2</sub> : power output relationship in a ramp test in professional cyclists : possible association with blood hemoglobin concentration, *Jap P Physiol*, 52, 1, 95-103
91. Lucia A, Rivero JLL, Serrano AL, Calbet JAL, Santalla A, Chicharro JL (2002c) Determinants of VO<sub>2</sub> kinetics at high power outputs during a ramp exercise protocole, *Med Sci Sport Exerc*, 34, 2 : 326-31
92. MacIntosh BR, Svedahl K, Kim M (2004) Fatigue and optimal conditions for short-term work capacity, *Eur J Appl Physiol*, 92, 4-5 : 369-75
93. Marsh AP, Martin PE, Foley KO (2000) Effect of cadence, cycling experience, and aerobic power on delta efficiency during cycling, *Med Sci Sports Exerc*, 32, 9 : 1630-4
94. McDaniel J, Durstine JL, Hand GA, Martin JC (2002) Determinants of metabolic cost during submaximal cycling, *J Appl Physiol*, 93, 3 : 823-8

95. McNaughton L et Thomas D (1996) Effects of differing pedalling speeds on the power-duration relationship of high intensity cycle ergometry, *Int J Sports Med*, 17, 4 : 287-92
96. Medbo JI et Toska K (2001) Lactate release, concentration in blood, and apparent distribution volume after intense bicycling, *Jap J Physiol*, 51 : 303-12
97. Medelli J (2000) Catécholamine et exercice musculaire, Thèse, Doctorat Européen en génie biologique et médical, Amiens 21 juin.
98. Medelli J, Maingourd Y, Bouferrache B, Bach V, Freville M, Libert JP (1993) Maximal oxygen uptake and aerobic-anaerobic transition on treadmill and bicycle triathletes, *Jap J Physiol*, 43: 347-60
99. Messonnier L, Freund H, Bourdin M, Belli A, Lacour JR (1997) Lactate exchange and removal abilities in rowing performance, *Med Sci Sports Exerc*, 29, 3 : 396-401
100. Morgan DW, Tseh W, Caputo JL, Keefer DJ, Craig IS, Griffith KB, Akins M-B, Griffith GE, Martin PE (2002) Longitudinal profiles of oxygen uptake during treadmill walking in able-bodied children : the locomotion energy and growth study, *Gait and Posture*, 15 : 230-5
101. Moseley L, Achten J, Martin JC, Jeukendrup AE (2004) No differences in cycling efficiency between world-class and recreational cyclists, *Int J Sports Med*, 25, 5 : 374-9

102. Neary JP, Bhambhani YN, Quinney HA (1995) Validity of breathing frequency to monitor exercise intensity in trained cyclists, *Int J sports med*, 16, 4 : 255-9
103. Nichols JF, Phares SL, Buono MJ (1997) Relationship between blood lactate response to exercise and endurance performance in competitive female master cyclists, *Int J of Sp Med*, 18, 6 : 458-63
104. Ocel JV, Miller LE, Pierson LM, Wootten DF, Hawkins BJ, Myers J, Herbert WG (2003) Adaptation of pulmonary oxygen consumption slow component following 6 weeks of exercise training above and below the lactate threshold in untrained men, *Chest*, 124, 6 : 2377-83
105. Ogata H, Reyihan A, Yano T (2004) Kinetics of oxygenation in inactive forearm muscle during ramp leg cycling, *J Physiol Anthropol Appl Human Sci*, 23, 1 : 7-17
106. Okura T, Tanaka K (2001) A unique method for predicting cardiorespiratory fitness using rating of perceived exertion, *J Physiol Anthropol Appl Human Sci*, 20, 5 : 255-61
107. Osteras H, Helgerud J, Hoff J (2002) Maximal strength-training effects on force-velocity and force-power relationships explain increases in aerobic performance in humans, *Eur J appl physiol*, 88 : 255-63

108. Padilla S, Mujika I, Angulo F, Goiriena JJ (2000) Scientific approach to the 1 –h cycling world record : a case study, *J Appl Physiol*, 89 : 1522-7
109. Palmer GS, Borghouts LB, Noakes TD, Hawley JA (1999) Metabolic and performance responses to constant-load vs variable-intensity exercise in trained cyclists, *J Appl Physiol*, 87, 3 : 1186-96
110. Pedersen PK, Sorensen JB, Jensen K, Johansen L, Levin K (2002) Muscle fiber type distribution and nonlinear  $\text{VO}_2$ -power output relationship in cycling, *Med Sci Sports Exerc*, 34, 4 : 655-61
111. Perez M, Lucia A, Santalla A, Chicharro JL (2003) Effects of electrical stimulation on  $\text{VO}_2$  kinetics and delta efficiency in healthy young men, *Br J Sports Med*, 37, 140-3
112. Perrey S et Candau R (2002) Déterminants des différentes phases de la cinétique de la consommation d'oxygène chez l'homme, *Sc sports*, 17 : 220-33
113. Pringle JS, Houst J, Carter H, Tolfrey K, Jones A (2003) Effect of pedal rate on primary and slow-component oxygen uptake responses during heavy-cycle exercise, *J Appl Physiol*, 94, 1501-7
114. Rehrer NJ (2001) Fluid electrolyte balance in ultra-endurance sport, *Sports Med*, 31 (10), 701-15

115. Rietjens GJW, Keiser HA, Kuipers H, Saris W (2001) A reduction in training volume and intensity for 21 days does not impair performance in cyclists, *Br J Sports Med*, 35 : 431-4
116. Rieu M (1987) Données actuelles sur l'entraînement en endurance aérobie et anaérobie, Actes du 6<sup>ème</sup> séminaire de Bioénergétique, 20-21 mars 1986, Revue EPS, Paris
117. Ringwood JV (1999) Anaerobic threshold measurement using dynamic neural network models, *Computers in biol med*, 29 : 259-71
118. Robergs RA, Chwalbinska-Moneta J, Mitchell JB, Pascoed D, Houmar J, Costill DL (1990) Blood lactate threshold differences between arterialized and venous blood, *Int J of Sp Med*, 11, 6 : 446-51
119. Roecker K, Schotte O, Niess AM, Horstmann T, Dickhuth HH (1998) Predicting competition performance in long-distance running by means of a treadmill test, *Med Sci Sports Exerc*, 30, 10 : 1552-7
120. Sagiv M, Rotstein A, Ben-Sira D, Grodjinovsky A, Fisher N, Kaufmann D (1991) Physiological responses to wrist weights during endurance cycling in normal subjects, *Med Sci Sports Exerc*, 23, 6 : 748-51
121. Sarre G, Lepers R, Maffiuletti N, Millet G, Martin A (2003) Influence of cycling cadence on neuromuscular activity of the knee extensors in humans, *Eur J Appl Physiol*, 88, 4-5 : 476-9

122. Scheuermann BW, Hoelting BD, Noble ML, Barstow ML (2001) The slow component of O<sub>2</sub> uptake is not accompanied by changes in muscle EMG during repeated bouts of heavy exercise in humans, *J Physiol*, 531, 1 : 245-56
123. Scheuermann BW, Bell C, Paterson DH, Barstow TJ, Kowalchuk JM (2002) Oxygen uptake kinetics for moderate exercise are speeded in older humans by prior heavy exercise, *J Appl Physiol*, 92 : 609-16
124. Schuler PB, Martino M, Abadie BR, Stout TW, Conn PT, Wang MQ (1998) Lactate production in response to maximal and submaximal StairMaster PT4000 and treadmill exercise, *J Sports Med Phys Fitness*, 38, 3 : 215-20
125. Shimana T, Kondo N, Koga S, Kashimoto T, Iwata A (1991) Study on the limitation for detecting anaerobic threshold by respiratory frequency, *Ann Physiol Anthropol*, 10, 4 : 237-42
126. Smith MF, Balmer J, Coleman DA, Bird SR, Davidson RCR (2001) Method of lactate elevation does not affect the determination of the lactate minimum, *Med Sc Sports Exerc*, 34, 11 : 1744-9
127. Siciliano G, Renna M, Manca ML, Prontera C, Zucchelli G, Ferrannini E, Murri L (1999) The relationship of plasma catecholamine and lactate during anaerobic threshold exercise in mitochondrial myopathies, *Neuromuscular Disorder*, 9, 6-7 : 411-16

128. Spurway NC (1992) Aerobic exercise, anaerobic exercise and the lactate threshold, Br Med Bull, 48, 3 : 569-91
129. Stegmann H et Kindermann W (1982) Comparison of prolonged exercise tests at the individual anaerobic threshold and the fixed anaerobic threshold of 4 mmol.l(-1) lactate, Int J Sports Med, 3, 2 : 105-10
130. Swain DP et Wright RL (1997) Prediction of VO<sub>2</sub>peak from submaximal cycle ergometry using 50 versus 80 rpm, Med Sci Sports Exerc, 29, 2 : 268-72
131. Takeshima N, Kobayashi F, Watanabe T, Tanaka K, Tomita M, Pollock ML (1996) Cardiorespiratory responses to cycling exercise in trained and untrained healthy elderly : with special reference to the lactate threshold, Appl Human Sci, 15, 6 : 267-73
132. Thys H (2001) Introduction : regards de la bioénergétique sur les activités physiques et sportives au XX<sup>ème</sup> siècle, STAPS, 54 : 7-14
133. Tolfrey K, Armstrong N (1995) Child-adult differences in whole blood lactate responses in incremental treadmill exercise, Br J Sports Med, 29 (3) : 196-9
134. Tordi N, Perrey S, Harvey A, Hughson RL (2003) Oxygen uptake kinetics during two bouts of heavy cycling separated by fatiguing sprint exercise in humans, J Appl Physiol, 94, 533-41

135. Van Praagh E, Doré E, Duché P, Hautier C (2001) La puissance maximale aérobie de l'enfant (de 1938 à nos jours), STAPS, 54 : 89-108
136. Vercruyssen F, Brisswalter J, Hausswirth C, Bernard T, Bernard O, Vallier JM (2002) Influence of cycling cadence on subsequent running performance in triathletes, Med Sci Sports Exerc, 34, 3 : 530-6
137. Vincente-Rodriguez G, Jimenez-Ramirez J, Ara I, Serrano-Sanchez JA, Dorado C, Calbet JAL (2003) Enhanced bone mass and physical fitness in prepubescent footballers, Bone, 33 : 853-9
138. Washington RL (1999) Cardiorespiratory testing : anaerobic threshold/respiratory threshold, Pediatr Cardiol, 20 : 12-5
139. Wasserman K, Stringer WW, Casabury R, Koike A, Cooper CB (1994) Determination of the anaerobic threshold by gas exchange : biochemical considerations, methodology and physiological effects, Z kardiol, 83, suppl 3 : 1-12
140. Wasserman K (1984) The anaerobic threshold measurement to evaluate exercise performance, Am Rev Respir Dis., 129 : 35-40
141. Wassermann K, Whipp BJ, Koyal SN, Beaver WL (1973) Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise, J Appl Physiol, 35 : 236-43

142. Wassermann K et Mc Iroy MB (1964) detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise, *Am J Cardiol*, 14 : 844-52
143. Weber CL et Schneider DA (2002) Reliability of MAOD measured at 110% and 120% of peak oxygen uptake for cycling, *Med Sci Sports Exerc*, 33, 6 : 1056-9
144. Whipp BJ et Wasserman K (1972) Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant load work, *J Appl Physiol*, 33, 351-6
145. Whipp BJ et Mahler M (1980) In *Pulmonary gas exchange, volume II*, Academic Press, New York, ed. West J.B.
146. Williams JR, Armstrong N, Kirby BJ (1990) the 4 mM blood lactate level as an index of exercise performance in 11-13 year old children, *J Sports Sci*, 8, 2 : 139-47
147. Wilson MC, Jackson VN, Heddle C, Price NT, Pilegaard H, Juel C, Bonen A, Montgomery I, Hutter OF, Halestrap AP (1998) Lactic acid efflux from white skeletal muscle is catalyzed by the monocarboxylate transporter isoform MCT3, *J Biol Chemistry*, 273, 26 : 15920-6
148. Wyndham CH, Strydom NB, Maritz JS, Morrison JF, Peter T, Potgieter R (1959) Maximum oxygen intake and maximum heart rate during strenuous work, *J Appl Physiol*, 14: 922-36

149. Zoladz JA, Rademaker AC, Sargeant AJ (1995) Non-linear relationship between O<sub>2</sub> uptake and power output at high intensities of exercise in humans, *J Physiol*, 1, 211-7
150. Zoladz JA, Duda K, Majerczak (1998a) VO<sub>2</sub>/power output relationship and the slow component of oxygen uptake kinetics during cycling at different pedalling rates : relationship to venous lactate accumulation and blood acid-base balance, *Physiol Res*, 47, 427-38
151. Zoladz JA, Duda K, Majerczak J (1998b) Oxygen uptake does not increase linearly at high power outputs during incremental exercise test in humans, *Eur J Appl Physiol*, 77, 445-51
152. Zoladz JA, Szkutnik Z, Majerczak J, Duda K (1998c) Detection of point in oxygen uptake during an incremental exercise test using recursive residuals : relationship to the plasma lactate accumulation and blood acid base balance, *Eur J Appl Physiol*, 78, 369-77

Notre étude a concerné l'analyse, statique et dynamique, des paramètres enregistrés au cours de tests d'effort chez 109 cyclistes, sur ergocyclomètre électromagnétique. Elle avait pour but de montrer l'intérêt et l'importance de l'approche énergétique des tests d'effort chez le cycliste, à partir des valeurs de consommation d'oxygène statique et dynamique, de fréquence cardiaque, de puissance et de lactatémie déterminées au cours d'un test d'effort pouvaient être utiles à l'entraîneur afin d'organiser l'entraînement de ses cyclistes.

Nos hypothèses étaient qu'il existait des différences pour les valeurs statiques entre les âges, entre les niveaux, entre les spécialités et entre les moments de la saison et que la cinétique de l'oxygène permettait de discriminer les populations après le seuil, pour l'âge, le niveau, la spécialité et le moment de la saison et enfin que le test d'effort restait la base nécessaire de toute évaluation des cyclistes afin d'organiser leur entraînement.

Ainsi, nous avons montré que l'analyse statique a montré dans la population étudiée que la FC, en valeur absolue, n'était pas un bon indice pour exprimer l'intensité de l'exercice. Ceci limite la portée des équations simplifiées considérant la relation entre la FCmax théorique et l'âge, et rend hasardeux l'entraînement basé uniquement sur ce paramètre.

Il est apparu que les paramètres Pmax, VO<sub>2</sub>max et VCO<sub>2</sub>max sont discriminants pour caractériser le haut niveau et que la FCmax et la [La]smax apparaissent comme des faux témoins de l'implication aérobie, mais aussi que la puissance maximale semble être discriminante entre les VTT et les routiers. Enfin, l'analyse de la « Gross Efficiency » (GE) présente les valeurs les plus faibles pour les plus jeunes et les plus élevées pour les Nationaux, ce qui justifie de l'importance de la quantité d'entraînement dans l'amélioration de la performance.

L'analyse dynamique a montré une différence significative ( $p < .001$ ) des pentes avant le seuil et après le seuil, quel que soit l'âge, la spécialité, le niveau, ou le moment de la saison. Par ailleurs, il est apparu que le choix du seuil correspondant à la lactatémie de 4 mM est tout aussi fiable pour l'analyse des données que le seuil ventilatoire. La puissance est apparue comme discriminant de la performance et a montré la nécessité de réaliser des tests d'effort maximaux. L'analyse des  $\Delta$ slope a montré qu'il pourrait s'agir d'un indice du métabolisme anaérobie.

Le résultat d'incessO<sub>2</sub>, est difficile à utiliser, il pourrait s'agir comme l'on montré certains auteurs d'un indice d'efficacité motrice. Cependant, nos analyses ont aussi montré qu'il pourrait être lié à des problèmes de matériel de mesure dans la chaîne d'analyse des gaz expirés, matériel pourtant utilisé par d'autres auteurs.

Au final, l'ensemble de notre étude montre le bien fondé de l'évaluation des cyclistes par un test d'effort de laboratoire plus fiable que les tests de terrain où les mesures concomitantes sont moins nombreuses.