

Université de Pau et des Pays de l'Adour

Département STAPS de Tarbes

Maîtrise mention « Entraînement Sportif »

Suivi longitudinal des paramètres physiologiques d'une population de haut niveau en canoë-kayak spécialiste de l'épreuve de slalom : une analyse rétrospective

Mémoire présenté par :

Mohamed Hamdani et Guilhem Peyrot

Sous la direction de:

Bruno Cormery

Année universitaire 2002-2003

Session de Juin

Remerciements

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le Dr Marc Bouvard, médecin responsable du Centre de Médecine du Sport de Pau. Nous tenons tout d'abord à le remercier pour son accueil et ses services. Il nous a permis d'analyser les dossiers du suivi physiologique en laboratoire de sportifs de haut niveau et c'était pour nous un privilège. Par ailleurs sa disponibilité tout au long de l'année dans le suivi de ce projet était fort appréciable. Son aide a été aussi très importante pour la constitution de la bibliographie et pour notre culture personnelle sur la discipline du slalom.

Nous n'avons pas été indifférents à l'intérêt que Christophe Prigent et Sylvain Curinier, respectivement entraîneur de l'équipe de France de canoë-kayak slalom et entraîneur national au pôle France de Toulouse, ont porté à notre projet. Nous voudrions remercier plus particulièrement Sylvain Curinier pour nous avoir transmis les données des sportifs aux tests de terrain et pour ses documents complémentaires.

Bien entendu sans l'accord des athlètes nous n'aurions pu participer à cette étude. Nous les remercions tous pour leur sympathie et pour avoir répondu à notre demande quant à l'analyse de leurs données. Nous leur souhaitons bon courage pour la suite.

Nos remerciements vont aussi au Pr François Carré, médecin fédéral de la FFCK, pour nous avoir bien aidé et pour nous avoir adressé son article sur la rétro-extrapolation de la $\dot{V}O_2$ en slalom. Cela nous a été très utile.

Par ailleurs nous avons été très sensibles également à l'aide de Thierry Paillard, Olivier Edeline et Philippe Passelergue, enseignants au STAPS de Tarbes. Nous leur sommes très reconnaissants pour leurs précieuses informations.

Enfin nous avons été très heureux de pouvoir travailler sous la direction de Bruno Cormery pendant cette année de maîtrise. Nous tenons à le féliciter pour la qualité de son enseignement et pour l'ambiance agréable qui s'en dégage.

Sommaire

<u>Introduction</u>	<u>1</u>
<u>1. Revue de littérature</u>	<u>3</u>
<u>1.1. Présentation de l'activité canoë-kayak</u>	<u>3</u>
<u>1.1.1. Définition et spécificité</u>	<u>3</u>
<u>1.1.2. La compétition en canoë-kayak slalom</u>	<u>4</u>
<u>1.1.2.1. Les différentes spécialités</u>	<u>4</u>
<u>1.1.2.2. Analyse de la tâche</u>	<u>4</u>
<u>1.2. Données physiologiques</u>	<u>5</u>
<u>1.2.1. Profil physiologique du canoë-kayak de course en ligne</u>	<u>6</u>
<u>1.2.1.1. Etude intrinsèque</u>	<u>6</u>
<u>1.2.1.2. Etude comparative</u>	<u>7</u>
<u>1.2.2. Tests de laboratoire et de terrain en canoë-kayak</u>	<u>9</u>
<u>2. Problématique</u>	<u>12</u>
<u>3. Méthodologie</u>	<u>13</u>
<u>3.1. Population</u>	<u>13</u>
<u>3.2. Tests de laboratoire</u>	<u>13</u>
<u>3.2.1. Matériel</u>	<u>13</u>
<u>3.2.2. Mesure directe de la $\dot{V}_{O_2 \text{ max}}$ au test de puissance maximale aérobie</u>	<u>14</u>
<u>3.2.2.1. Protocole</u>	<u>14</u>
<u>3.2.2.2. Chaîne de mesure</u>	<u>15</u>
<u>3.2.2.3. Variables évaluées</u>	<u>16</u>
<u>3.2.3. Test de Force-Vitesse</u>	<u>16</u>
<u>3.2.3.1. Protocole</u>	<u>16</u>
<u>3.2.3.2. Chaîne de mesure</u>	<u>17</u>
<u>3.2.3.3. Variables évaluées</u>	<u>17</u>
<u>3.2.4. Test de Wingate</u>	<u>18</u>
<u>3.2.4.1. Protocole</u>	<u>18</u>
<u>3.2.4.2. Chaîne de mesure</u>	<u>18</u>
<u>3.2.4.3. Variables évaluées</u>	<u>18</u>
<u>3.3. Mesures anthropométriques</u>	<u>19</u>
<u>3.4. Tests de terrain</u>	<u>19</u>
<u>3.4.1. Caractéristiques du plan d'eau et matériel</u>	<u>19</u>

<u>3.4.2.</u>	<u>Test de 45 secondes</u>	20
<u>3.4.2.1.</u>	<u>Protocole</u>	20
<u>3.4.2.2.</u>	<u>Variables évaluées</u>	20
<u>3.4.3.</u>	<u>Test de 7 minutes</u>	21
<u>3.4.3.1.</u>	<u>Protocole</u>	21
<u>3.4.3.2.</u>	<u>Variables évaluées</u>	21
3.5.	Démarche	22
3.6.	Analyse statistique	23
4.	Résultats	24
4.1.	Caractéristiques anthropométriques	24
<u>4.1.1.</u>	<u>Comparaison intergroupe</u>	24
<u>4.1.2.</u>	<u>Evolution rapportée à l'âge</u>	25
<u>4.1.3.</u>	<u>Evolution rapportée à l'année</u>	25
4.2.	Tests de laboratoire	26
<u>4.2.1.</u>	<u>Comparaison intergroupe</u>	26
<u>4.2.2.</u>	<u>Evolution rapportée à l'âge</u>	27
<u>4.2.3.</u>	<u>Evolution rapportée à l'année</u>	27
4.3.	Corrélations entre tests de laboratoire et tests de terrain	28
<u>4.3.1.</u>	<u>Les tests anaérobies</u>	28
<u>4.3.2.</u>	<u>Les tests aérobies</u>	29
5.	Discussion	31
5.1.	Caractéristiques physiologiques	31
5.2.	Evolution des paramètres physiologiques dans le temps	33
5.3.	Corrélations	33
<i>Conclusion</i>		35
<i>Bibliographie</i>		37
<i>Annexes</i>		

Introduction

Les informations que nous tirons de la revue de littérature concernant la physiologie de l'effort du canoë-kayak nous permet d'affirmer que la course en ligne est la discipline la plus abordée parmi toutes celles rattachées au canoë-kayak (Tesch et al., 1975 ; Shephard, 1987 ; Fry et Morton, 1991 ; Astrand et Rodahl, 1994 ; Billat et al., 1996 ; Faina et al., 1997 ; Zamparo et al., 1999 ; Van Someren et al., 2000). Il semblerait que cette préférence soit due au fait que la course en ligne est techniquement beaucoup plus simple d'approche que les autres pratiques.

Par définition la course en ligne est au canoë-kayak ce que la course sur piste est à l'athlétisme car dans les deux cas, au-delà du fait que le cadre soit standardisé et stable, les épreuves présentent également des modalités similaires. C'est pourquoi la méthodologie appliquée à la course en ligne pour déterminer les paramètres physiologiques de l'exercice musculaire dans cette discipline rejoue vraisemblablement celle des épreuves de course en athlétisme. Ce parallèle n'est pas anodin puisque l'athlétisme constitue une référence en matière de recherche dans le secteur de la physiologie de l'exercice.

Comparativement à la course en ligne, le canoë-kayak slalom est une discipline compétitive de "pleine nature" qui se déroule dans un milieu instable et aléatoire. L'essence même de cette spécialité contribue à créer une ambiance sportive spectaculaire mais ceci impliquerait en contrepartie des difficultés méthodologiques pour le recueil des données en physiologie de l'exercice. En effet les contraintes liées à la nature de cette activité engendrent une complexité telle qu'un examen des qualités physiques dans le contexte réel du slalom n'est pas forcément évident. D'où l'élaboration de situations aménagées en eau calme (Carré et al., 1994 ; FFCK, 1999 ; Sivy, 2000). Ainsi les entraîneurs nationaux, entre autre, se basent plutôt sur ce modèle pour l'évaluation de leurs athlètes. Il semblerait que ces dispositions

n'altèrent pas ou peu l'efficacité des programmes d'entraînement puisque les compétiteurs français en slalom comptent parmi les meilleurs mondiaux.

En outre, depuis sa réapparition sur la scène olympique lors des jeux de Barcelone en 1992, le canoë-kayak slalom occupe de par sa spécificité une place importante et originale au niveau international. L'accès à ce statut a suscité au sein de la Fédération Française de Canoë-Kayak un intérêt grandissant pour le suivi physiologique longitudinal des slalomeurs français de haut niveau en laboratoire et sur le terrain en vue d'une optimisation de la performance. Par conséquent l'ensemble des données archivées à cette occasion constituerait une base précieuse d'informations relatives aux aspects physiologiques des sportifs experts en canoë-kayak slalom.

L'objet de ce travail d'étude et de recherche consiste en une analyse rétrospective des caractéristiques physiologiques de ces athlètes recueillies sur plusieurs années de suivi.

1. Revue de littérature

1.1. Présentation de l'activité canoë-kayak

Le canoë-kayak est en réalité un terme générique pour une multitude de disciplines nautiques qui se répartissent en trois familles :

- Eau calme : course en ligne, kayak polo (sport collectif propre au kayak), marathon (course de longue distance sur plan d'eau ou rivière calme), dragon boat (course entre grandes embarcations de 20 pagayeurs) et randonnée.
- Eau vive : slalom, descente, nage en eau vive, kayak freestyle (acrobatis en eau vive), raft (canot pneumatique collectif d'eau vive) et kayak extrême (kayak en rivière de haute difficulté).
- Mer : wave ski (hybride entre le surf et le kayak), kayak de mer, merathon (course de longue distance) et pirogue Va'a (discipline d'origine polynésienne).

1.1.1. Définition et spécificité

Le canoë-kayak est une activité locomotrice dont le support est une embarcation mue par une pagaie pour réaliser des trajectoires précises. On ne distingue pas ici le canoë du kayak dans la mesure où ces deux composantes répondent aux mêmes exigences et à la même logique. Elles font appel à des capacités identiques. Cependant, si l'on considère le canoë et le kayak en tant que pratiques compétitives, celles-ci diffèrent d'un point de vue technique car dans le premier cas le déplacement se fait à l'aide d'une pagaie simple à genou et dans l'autre on utilise une pagaie double en position assise.

Parmi toutes les activités sportives, le canoë-kayak présente l'originalité d'être pratiquement le seul sport de compétition dans lequel la quasi-totalité du travail doit être assurée par les muscles des membres supérieurs et du tronc. En effet l'action en canoë-kayak met en jeu une charnière qui relie une partie motrice (membres supérieurs et tronc) à une partie assurant l'équilibre (membres inférieurs et ceinture pelvienne).

1.1.2. La compétition en canoë-kayak slalom

1.1.2.1. Les différentes spécialités

Les spécialités lors d'une épreuve de slalom sont au nombre de quatre :

- Trois pour les hommes : kayak Homme (K1), canoë monoplace (C1) et canoë biplace (C2).
- Une chez les femmes : kayak Dame (K1).

Précisons qu'il n'existe pas de catégorie biplace en kayak slalom.

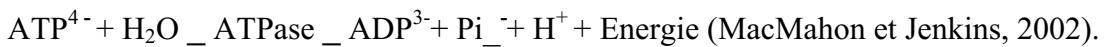
1.1.2.2. Analyse de la tâche

La compétition de slalom consiste à réaliser un parcours en eau vive contre-la-montre comportant 18 à 25 portes et des obstacles à éviter (rochers). La réalité de l'épreuve impose donc aux concurrents de surmonter à chaque instant une force extérieure générée par le courant. De plus les candidats doivent passer entre les portes sans les toucher dans le sens de la descente pour certaines et en remontée pour les autres. La durée de l'épreuve varie d'une compétition à l'autre car la distance effective à couvrir n'est jamais la même (on est passé de 3 minutes aux Jeux Olympiques d'Atlanta en 1996 à 1 minute 30 secondes lors des championnats du monde à Bourg-Saint-Maurice en 2002).

Cette description met en lumière une approche propre au slalom. Il s'agit de répondre à des informations visuelles tout en alliant vitesse, précision et équilibre pour se propulser. Des actions telles que circulaire ou appel requièrent certains automatismes. La dissociation entre membres supérieurs et membres inférieurs est primordiale ainsi qu'un gainage du tronc et une implication des membres inférieurs pour assurer le maintien de l'équilibre combinant gîte (axe latéral) et assiette (axe longitudinal) (Cheutin, 2001).

1.2. Données physiologiques

Comme tout effort physique, un déplacement en canoë-kayak induit nécessairement des contractions musculaires qui ne sont possibles qu'en présence d'énergie. Celle-ci est produite par la dégradation d'une entité chimique directement disponible au niveau du muscle : l'adénosine triphosphate (ATP). La réserve en ATP mobilisée lors de l'exercice musculaire est très limitée et s'épuise après quelques secondes d'effort. L'énergie libérée provient de l'hydrolyse de l'adénosine triphosphate (ATP) en adénosine diphosphate (ADP) et en phosphate inorganique (Pi) dont la réaction s'écrit :

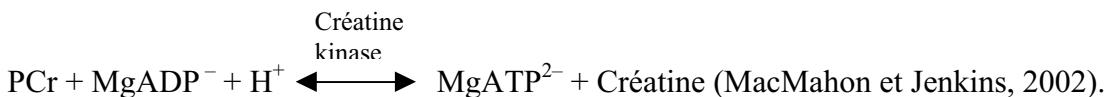


Pour assurer la continuité de l'effort, trois voies métaboliques contribuent à la re-synthèse de l'ATP.

Deux voies métaboliques sont de type anaérobie. Ces voies sont particulièrement importantes au début de l'exercice, surtout lorsque la demande énergétique est élevée.

La phosphocréatine (PCr) qui subit la dégradation représentée dans la réaction ci-après constitue la réserve énergétique la plus rapide et la plus précoce pour restituer l'ATP lors de l'exercice musculaire.

L'équation de la réaction est la suivante :



La deuxième voie métabolique anaérobie active une série de neuf réactions biochimiques : il s'agit de la glycolyse anaérobie. Celle-ci a un délai plus long que le système des phosphagènes pour être complètement sollicitée. Néanmoins la glycolyse anaérobie intervient dès le début de l'exercice.

Durant les efforts à très haute intensité, la glycolyse anaérobie est autorégulée. En effet les ions hydrogène (ions H⁺) qui sont produits lors de la glycolyse peuvent affecter la contraction

musculaire. Bien qu'il existe d'autres mécanismes possibles pour la régulation de la contraction, l'inhibition des enzymes clefs et la perturbation des protéines musculaires apparaissent comme les conséquences les plus marquées de la production excessive d'ions H⁺ dans le muscle.

Lorsque l'effort se poursuit, le système énergétique restant nécessite de l'O₂: c'est le métabolisme aérobie. Le système aérobie n'est pas capable de produire un niveau d'intensité d'effort aussi important (puissance inférieure) que la dégradation de la PCr ou de la glycolyse. Par contre il permet de maintenir un pourcentage sous-maximal de la $\dot{V}O_2$ max pendant plusieurs heures (capacité supérieure).

La $\dot{V}O_2$ max représente la consommation maximale d'oxygène d'un individu. Elle peut être exprimée en valeur absolue ($l \cdot min^{-1}$ d'O₂) ou bien rapportée au poids de corps ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ d'O₂). On considère souvent la $\dot{V}O_2$ max comme un indicateur important de la performance du système aérobie.

A partir de ces données, une étude des caractéristiques de l'exercice musculaire en canoë-kayak devrait nous permettre d'explorer le métabolisme énergétique sollicité chez les athlètes de course en ligne et les slalomeurs afin d'établir par la suite un parallèle.

1.2.1. Profil physiologique du canoë-kayak de course en ligne

1.2.1.1. Etude intrinsèque

Les premières investigations sur le canoë-kayak ont démontré que la capacité aérobie des membres supérieurs constitue le critère de base de la performance en course en ligne (Tesch et al., 1975). Ces auteurs ont comparé, chez les canoë-kayakistes seniors suédois de haut niveau, les $\dot{V}O_2$ max atteintes successivement lors d'un travail des membres inférieurs effectué sur bicyclette ergométrique, lors d'un exercice de pédalage des bras et lors d'un

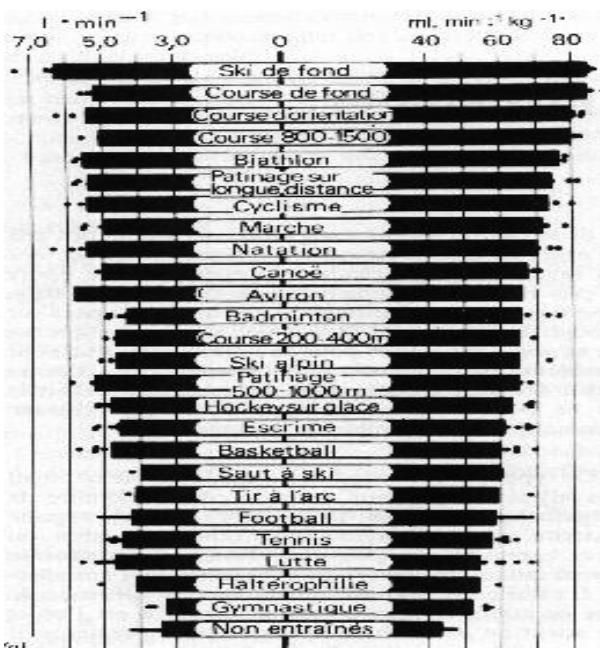
exercice de pagayage en condition réelle. Les expérimentateurs ont relevé, lors du travail des bras et pendant l'épreuve de pagayage, une valeur moyenne de $\dot{V}O_2$ max de l'ordre de 87% du niveau enregistré lors du travail des membres inférieurs. Les canoë-kayakistes sont donc capables d'utiliser avec les bras un pourcentage très élevé de leur $\dot{V}O_2$ max évaluée lors d'un exercice mobilisant les membres inférieurs, soit des masses musculaires beaucoup plus volumineuses.

Une autre recherche a tenté d'émettre une idée des proportions du système aérobie et du système anaérobie dans la fourniture énergétique totale selon la distance de compétition considérée (Tesch et al., 1975). D'après l'opinion des auteurs l'influence sur le résultat de la composante aérobie de la $\dot{V}O_2$ max augmenterait avec la distance. Cette répartition des processus énergétiques en fonction de l'épreuve a également fait l'objet d'une étude plus récente (Zamparo et al., 1999). Les expérimentateurs ont proposé à 8 athlètes de moyens à haut niveau un test de terrain sur eau plate. Ils leurs ont demandé d'effectuer, dans un kayak standard de course en ligne, 4 sprints de distance croissante (250-500-1000-2000 m). A l'issue du test, les valeurs de la contribution aérobie dans l'apport énergétique selon le type de sprint atteignent 57% sur 250 m, 73% sur 500 m, 85% sur 1000 m et 91% de la $\dot{V}O_2$ max sur 2000 m. On constate donc que la puissance moyenne fournie par les processus oxydatifs s'élève avec la distance alors que celle correspondant à la source anaérobie évolue en sens inverse. Les résultats de l'étude se traduisent en une tendance qui est en accord avec la conception de Tesch et al. (1975).

1.2.1.2. Etude comparative

Les observations émises en 1975 par Tesch et al. ont été synthétisées dans un travail dont l'un des buts était de classer différentes activités sportives en fonction de la $\dot{V}O_2$ max sollicitée, au niveau international, dans chaque spécialité (voir FIGURE A) (Astrand et Rodahl, 1994).

FIGURE A. Consommation maximale d' O_2 .



Consommation maximale d'oxygène moyenne, absolue ($l.\min^{-1}$) et relative ($\text{ml}.\text{kg}^{-1}.\min^{-1}$) des équipes masculines de différentes disciplines. Les points représentent des valeurs individuelles supérieures à la moyenne (d'après Astrand et Rodahl, 1994).

En support de ce travail de compilation, certaines études ont confirmé les tendances résumées par Astrand et Rodahl en comparant différentes disciplines cycliques d'endurance (Billat et al., 1996 ; Faina et al., 1997). Ainsi les travaux pré-cités ont rapporté des valeurs de $\dot{V}\text{O}_2 \text{max}$ chez les canoë-kayakistes de course en ligne sensiblement inférieures à celle des cyclistes sur route ou coureurs d'endurance au niveau national.

Par ailleurs le profil physiologique du kayakiste a également été abordé au travers de l'étude de la cinétique d' O_2 . En effet il peut paraître intéressant d'évoquer un travail qui avait pour but de déterminer la part du système anaérobie dans la performance de temps limite à $\dot{V}\text{O}_2 \text{max}$ (Faina et al., 1997). Cette étude s'appuie sur la relation entre temps limite et déficit d'oxygène (AOD) sachant que ce dernier est couvert par les processus anaérobies. Les auteurs ont montré, par comparaison entre populations de cyclistes ($n=8$), kayakistes de course en ligne spécialistes de 1000m ($n=7$) et nageurs de 400m ($n=8$), que lors d'un exercice

de temps limite à intensité associée à leur $\dot{V}O_2$ max respective réalisé sur ergomètre spécifique, il y a une corrélation significative entre la performance de temps limite et la valeur du déficit d'oxygène (AOD). Cependant une exception mérite d'être soulignée : les kayakistes présentent le temps de maintient le plus élevé alors qu'ils ont les plus faibles valeurs d'AOD et de $\dot{V}O_2$ max. Il semblerait que les nageurs de 400m tendent à effectuer le test de maintient avec la plus large proportion d'énergie anaérobie alors que les kayakistes, bien qu'ils aient la plus faible $\dot{V}O_2$ max, présentent la tendance inverse ; ils seraient capables d'utiliser, à une intensité correspondant à leur $\dot{V}O_2$ max, une énergie aérobie importante.

Au-delà de la détermination du profil physiologique, la recherche en physiologie de l'exercice est également un moyen de répondre aux besoins des sportifs pour l'amélioration de leur performance.

1.2.2. Tests de laboratoire et de terrain en canoë-kayak

Dans le domaine de la course en ligne, des auteurs ont étudié l'adéquation qui pourrait exister entre un test de pagayage en eau calme et un test sur ergomètre censé reproduire la réalité du terrain (Van Someren et al., 2000). La population sélectionnée pour l'expérience est composée de 9 kayakistes de différents niveaux dont la spécialité reste imprécise. Le protocole consiste à parcourir le maximum de distance en 4 min sur l'eau dans un kayak et ensuite de développer le maximum d'énergie en 4 min lors d'un test validé sur ergomètre de pagayage (K1 ERGO). Ainsi les expérimentateurs ont relevé des pics de $\dot{V}O_2$ identiques entre la mesure directe en laboratoire et celle effectuée sur le terrain. D'après les résultats, le pic de $\dot{V}O_2$ exprimé à la fois en $l.min^{-1}$ et en $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ est significativement corrélé avec la distance parcourue sur le terrain alors qu'il n'y a pas de lien entre la masse corporelle et la performance. L'interprétation déduite de ce résultat suggère que le poids corporel n'influence

pas ou peu les forces de frottement sur l'eau chez ces athlètes contrairement aux coureurs à pied qui doivent supporter leur poids à chaque foulée.

Dans des conditions plus proches du canoë-kayak slalom, une étude a été menée sur la rétro-extrapolation de la $\dot{V}O_2$ chez une population bien entraînée dans cette discipline (Carré et al., 1994). L'objectif était de déterminer la $\dot{V}O_2$ max par comparaison des mesures directes à des valeurs estimées à partir d'une rétro-extrapolation de la courbe d' O_2 post-exercice inspirée d'un travail antérieur (Léger et al., 1980). Ces athlètes ($n=18$) ont subi un test de laboratoire et un test de terrain. Le test de laboratoire correspond à un effort progressif et intermittent par paliers effectué sur ergomètre des membres supérieurs avec mesure directe de la $\dot{V}O_2$. Le test de terrain consiste à parcourir en slalom une distance matérialisée par des bouées alignées. Les athlètes doivent enchaîner quatre fois le parcours, selon un effort progressif continu, avec augmentation de la vitesse à chaque passage. Les auteurs ont relevé à la fin de chacun des deux tests la cinétique de récupération d' O_2 . Cette mesure permet d'estimer la $\dot{V}O_2$ max par rétro-extrapolation au moyen de la méthode de Léger. D'après les résultats, les estimations de la $\dot{V}O_2$ max sur le terrain sont significativement corrélées avec les valeurs directes de $\dot{V}O_2$ max. De plus la $\dot{V}O_2$ max moyenne estimée sur le terrain est supérieure à celle mesurée directement.

Par ailleurs d'autres tests de terrain en eau calme ont été proposés ultérieurement afin d'affiner l'approche des qualités physiologiques requises en slalom : un test incrémental par paliers alternant 3 minutes d'effort et 3 minutes de récupération pour l'estimation de la capacité aérobie ; un test imposant deux efforts maximaux de 45 secondes entrecoupés de 3 minutes de repos censé estimer la capacité anaérobie lactique, puis une estimation de la capacité anaérobie alactique avec un sprint sur 20 mètres départ arrêté (Sivy, 2000). Cet auteur recommande ces tests pour aider à la planification de l'entraînement mais aucune corrélation avec les tests de laboratoires correspondants n'a été recherchée. Un travail

succédant à l'étude de Sivy complète ses informations en rappelant que, dans la préparation physique des athlètes slalomeurs, l'élaboration des contenus d'entraînement dépend à la fois de l'analyse de la tâche et de l'évaluation des qualités physiques (Cheutin, 2001).

En conclusion, l'action de pagayage révèle toute la spécificité du canoë-kayak : un sport dont l'implication des membres supérieurs est prépondérante d'un point de vue biomécanique, ce qui induit des adaptations physiologiques propres (Tesch et al., 1975). La performance en course en ligne dépendrait vraisemblablement des qualités aérobies dont la sollicitation augmente avec la distance (Tesch et al., 1975 ; Zamparo et al., 1999). Toutefois la $\dot{V}O_2$ max relevée dans cette pratique reste inférieure à celles répertoriées dans les autres disciplines sportives cycliques d'endurance en raison d'une différence de masse musculaire mobilisée (Astrand et Rodhal, 1994 ; Billat et al., 1996 ; Faina et al., 1997).

L'approche physiologique du canoë-kayak a, par ailleurs, été envisagée à travers des tests d'évaluation permettant de prédire la performance physiologique (Van Someren et al., 2000 ; Carré et al., 1994) ou de contrôler l'entraînement (Sivy, 2000). En effet les tests de corrélation indiquent qu'il existe un lien entre le contexte du laboratoire et celui du terrain aussi bien en canoë-kayak de course en ligne (Van Someren et al., 2000) qu'en slalom (Carré et al., 1994). De même il est reconnu que le développement des qualités physiques en slalom doit être évalué de manière spécifique (Sivy, 2000) tout en répondant à l'analyse de la tâche (Cheutin, 2001).

D'après la revue de littérature, nous constatons enfin que la distinction entre le canoë et le kayak en physiologie de l'exercice n'est pas clairement définie.

2. Problématique

Les caractéristiques de notre thème d'étude nous amènent à aborder certaines questions concernant directement le domaine du haut niveau en canoë-kayak slalom. Tout d'abord il nous semble que l'étude préalable du profil physiologique de pratiquants spécialistes soit primordiale car nous sommes confrontés à quelques interrogations fondamentales :

Quel est le profil physiologique de l'élite en canoë-kayak slalom ?

Y-a-t-il une différence d'un point de vue physiologique entre les groupes canoë et kayak ?

Il est nécessaire, ensuite, de mettre cette première problématique en relation avec le contexte du suivi longitudinal pour en dégager une question complémentaire :

Observe-t-on une évolution dans le temps des paramètres physiologiques chez des sportifs de haut niveau dans cette discipline ?

Il serait intéressant finalement d'explorer les liens qui pourraient apparaître entre les conditions d'évaluation des qualités physiques en laboratoire et celles du terrain chez les sportifs très qualifiés en slalom.

Ainsi existe-t-il une adéquation entre la performance de laboratoire et les résultats aux tests de terrain spécifiques à la discipline ?

3. Méthodologie

3.1. Population

L'échantillon étudié se compose de 10 compétiteurs en canoë-kayak slalom dont l'âge varie de 18 à 30 ans. La population, entièrement masculine, comprend 5 kayakistes, 3 sportifs appartenant à la catégorie canoë monoplace (C1) et 2 individus concourant en catégorie canoë biplace (C2). L'ensemble du groupe se situe au niveau international voire olympique.

L'accès aux dossiers individuels de suivi physiologique en laboratoire et sur le terrain a nécessité une demande de consentement préalable présentée à chaque athlète.

3.2. Tests de laboratoire

Dans le cadre du suivi de leur entraînement, les slalomeurs de haut niveau ont demandé au laboratoire de biologie et de médecine du sport du centre hospitalier de Pau (64) d'organiser des tests d'évaluation physique. Afin d'être plus proche de la spécificité du canoë-kayak, l'équipe scientifique a dû porter certains changements sur l'ergocycle utilisé.

3.2.1. Matériel

L'ensemble des tests de laboratoire ont été effectués sur un ergocycle (Monark 864, Suède) adapté, pour l'occasion, à l'activité des membres supérieurs. Les expérimentateurs ont modifié, de manière artisanale, l'appareil d'origine en un dispositif plus adéquat pour évaluer les canoë-kayakistes slalomeurs en laboratoire. L'ergocycle repose sur un socle de hauteur variable afin de créer des conditions optimales de pédalage des bras pour chacun des individus quel que soit la position (assise ou debout). Le mouvement est facilité par la suppression de la selle et le changement des pédales en poignées.

3.2.2. Mesure directe de la $\dot{V}O_2$ max au test de puissance maximale aérobie

3.2.2.1. Protocole

Le dispositif impose au pratiquant de pédaler avec les bras assis face à l'ergocycle sur un siège réglable en hauteur, jambes calées à l'horizontale sur l'échafaudage du socle pour reproduire la position du terrain.

L'épreuve en elle-même est basée sur la méthode triangulaire qui consiste en une augmentation des charges par paliers de 3 minutes jusqu'à arrêt de l'effort dû à la fatigue (Astrand et Saltin, 1961).

La démarche adoptée ici s'organise en trois étapes :

- Un échauffement de 4 minutes dont la charge est adaptée pour atteindre une fréquence cardiaque de $130 \text{ bat}.\text{min}^{-1}$ à la fin de cette période.
- A la fin de l'échauffement, la puissance est augmentée de 30 Watts toutes les 3 minutes. L'effort doit être maintenu jusqu'à épuisement sous les encouragements de l'expérimentateur. On considère l'individu fatigué lorsque celui-ci n'est plus capable de conserver la fréquence de pédalage demandée, indiquée par le compte-tours électronique. L'exercice proposé aux canoë-kayakistes est conçu de telle sorte à ce que les individus effectuent un effort d'au moins 15 minutes. En effet une durée de 8 à 20 minutes est essentielle pour ne pas sous-estimer la $\dot{V}O_2$ max (Lampert et al., 1998 ; SFMS, 1999).
- Une récupération active de 6 minutes à une intensité de 30 Watts succède à l'arrêt de l'effort (Flandrois, 1994 ; Sivy, 2000).

A l'initiative des expérimentateurs, la cadence de pédalage est paramétrée à $60 \text{ rev}.\text{min}^{-1}$ pour toute la durée du test.

3.2.2.2. Chaîne de mesure

Les gaz expirés sont acheminés vers un système de mesure des échanges gazeux en continu (Oxycon Alpha, Jaeger, Allemagne) via un masque doté d'une valve unidirectionnelle de type Hans Rudolph et d'un tube flexible. L'appareil de mesure comprend :

- Un analyseur d' O_2 et CO_2 qui effectue un moyennage des gaz expirés toutes les 20 secondes. On peut ainsi suivre, dans la chambre de mélange, l'évolution des fractions expirées d' O_2 (F_{EO_2}) et de CO_2 (F_{ECO_2}) en parallèle avec l'incrémentation de charge.
- Un pneumotachographe qui mesure le volume expiré (\dot{V}_E).

Les expérimentateurs ont utilisé les données de ventilation pour déterminer la zone transitionnelle (premier seuil et deuxième seuil) à partir de la méthode ventilatoire (Wasserman et al., 1973).

- Une surveillance multipiste de l'électrocardiogramme. Il s'agit d'une analyse vectorielle du signal électrique dans plusieurs plans de l'espace. L'intérêt est d'augmenter la fiabilité de la mesure.

Quelques années auparavant, lors d'une proposition de consensus basée sur l'argumentaire d'une étude scientifique, 4 critères d'atteinte de la $\dot{VO}_{2\text{ max}}$ ont été définis :

- L'obtention d'un plateau de \dot{VO}_2 malgré une majoration de la puissance et une augmentation régulière de la ventilation.
- La fréquence cardiaque à la fin de l'épreuve doit être la plus proche possible de la fréquence cardiaque théorique (220-âge).
- Le quotient respiratoire (QR) représenté par le rapport VCO_2/VO_2 doit être compris entre 1.01 et 1.11.
- La lactatémie doit être supérieure à $6-8 \text{ mmol.l}^{-1}$, en considérant les caractères individuels (Lampert et al., 1998 ; SFMS, 1999).

Pour l'évaluation des slalomeurs, les expérimentateurs ne sont toujours restés fidèles qu'aux deux premiers critères car ils estiment que les autres sont matière à controverse.

3.2.2.3. Variables évaluées

Avant chaque épreuve, la teneur en O₂ dans l'air ambiant est mesurée pour quantifier la fraction inspirée d'O₂ (F_{IO₂}). En partant du postulat que les volumes gazeux inspiré et expiré sont superposables à espace mort constant, l'équipe scientifique a pu déterminer la $\dot{V}O_2$. Celle-ci est calculée directement par l'appareil selon la relation suivante :

$$\dot{V}O_2 = \dot{V}_I \times F_{IO_2} - \dot{V}_E \times F_{EO_2},$$
 où $\dot{V}O_2$ (en $l.\min^{-1}$) est la consommation d'O₂, \dot{V}_I (en $l.\min^{-1}$) représente le volume inspiré; F_{IO₂} (en %) correspond à la fraction d'O₂ inspirée, \dot{V}_E (en $l.\min^{-1}$) est le volume expiré et F_{EO₂} (en %), la fraction d' O₂ expirée (Monod et Flandrois, 2000). Ce calcul peut donc donner la $\dot{V}O_2$ max en $l.\min^{-1}$ puis en $ml.kg^{-1}.\min^{-1}$ en s'affranchissant du poids. Quand la $\dot{V}O_2$ max est atteinte, la puissance alors relevée est la puissance maximale aérobie. D'autre part la méthode ventilatoire permet d'estimer le premier et le deuxième seuil en terme de pourcentage de la $\dot{V}O_2$ max. La puissance à chacun des deux seuils est également retenue.

3.2.3. Test de Force-Vitesse

3.2.3.1. Protocole

Pour l'évaluation des canoë-kayakistes, le test est réalisé en station debout, après un échauffement d'au moins 5 minutes à faible charge. L'individu doit effectuer, sur l'ergocycle Monark adapté aux membres supérieurs, une série de "sprints" maximaux d'une durée de 5 à 7 secondes à des charges croissantes sachant que les premiers essais servent plutôt d'échauffement et de familiarisation à l'exercice. La charge initiale est fixée à 3 voire 4 kg.

Un repos passif de 5 minutes est respecté entre chaque répétition (Vandewalle et al., 1983 ; Sivy, 2000).

3.2.3.2. Chaîne de mesure

Le pédalier comporte 6 capteurs électromagnétiques de vitesse angulaire instantanée (JFB Médical, Lyon) reliés à une interface qui transforme l'information reçue en signal. Celui-ci est ensuite traité par informatique (logiciel spécial édité par JFB Médical, Lyon).

3.2.3.3. Variables évaluées

Théoriquement, la courbe force-vitesse révèle une section essentiellement linéaire entre 100 et 200 rev.min⁻¹ pour laquelle l'équation s'écrit : $V=V_0(1-F/F_0)$, où V (en rev.min⁻¹) représente le pic de vitesse relatif à la force F de freinage (en kg), V_0 (vitesse maximale contre charge nulle) correspond à l'intersection de la droite avec l'axe des ordonnées et F_0 (force maximale isométrique) se situe à l'intersection de la droite avec l'axe des abscisses (voir FIGURE B) (Vandewalle et al., 1983). Dans le cas présent les expérimentateurs ont alors essayé d'obtenir, à partir d'un test de régression linéaire, au moins 4 points de pic de vitesse se situant entre 100 et 200 rev.min⁻¹ pour compléter la relation force-vitesse et déterminer F_0 et V_0 par extrapolation. Outre les propriétés de force et de vitesse, le test force-vitesse explore aussi la puissance anaérobie (en Watts) des athlètes.

Lors de l'évaluation des canoë-kayakistes, c'est la puissance maximale anaérobie qui est calculée. D'un point de vue graphique, celle-ci a pour coordonnées une force égale à 0.5 F_0 et un pic de vitesse égal à 0.5 V_0 , ce qui donne la relation : $P_{max}=0.5 F_0 \times 0.5 V_0$ (voir FIGURE B) (Vandewalle et al., 1983). La valeur de la puissance maximale anaérobie a été ensuite rapportée au poids de corps (en W.kg⁻¹).

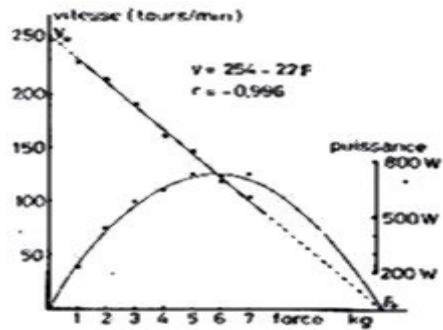


FIGURE B. Evolution du pic de vitesse et de la puissance correspondante en fonction de la force de freinage pour des exercices de pédalage réalisés avec les membres supérieurs sur cyclo-ergomètre Monark (d'après Vandewalle et al., 1983).

3.2.4. Test de Wingate

3.2.4.1. Protocole

Après un échauffement d'au moins 5 minutes, l'individu effectue un effort à vitesse maximale pendant 30 secondes en position debout. La force de freinage est paramétrée à $75\text{g}.\text{kg}^{-1}$ de poids corporel (soit environ 5 kg pour un sujet de 70 kg) pour toute la durée de l'épreuve. L'exercice est suivi d'une récupération active de 4 à 5 minutes (Sivy, 2000 ; Harichaux et Medelli, 2002).

3.2.4.2. Chaîne de mesure

Se référer au test de force-vitesse.

3.2.4.3. Variables évaluées

Le test est censé déterminer la puissance maximale anaérobie lactique (en Watts) (Harichaux et Medelli, 2002). Cependant certaines critiques à ce sujet suggèrent qu'il est préférable de parler de puissance maximale anaérobie. Celle-ci est calculée à partir de la valeur du pic de vitesse atteint (en $\text{rev}.\text{min}^{-1}$) multipliée par la résistance constante imposée (en kg) pendant l'effort (Sivy, 2000).

Le calcul de la vitesse moyenne de pédalage sert à exprimer la puissance moyenne anaérobie tout au long de l'épreuve selon le même type de relation. Les valeurs maximales et moyennes de puissance sont rapportées systématiquement au poids de corps (en $\text{W}.\text{kg}^{-1}$).

A titre d'information, il est à noter également que l'ensemble des tests de laboratoire ont respecté les normes scientifiques en matière de climatisation.

3.3. Mesures anthropométriques

En complément de chacune des épreuves d'effort, le laboratoire du CMS de Pau prévoit également un bilan anthropométrique des athlètes.

Les mesures anthropométriques renvoient à trois paramètres :

- la taille du sujet mesurée à l'aide d'une toise murale et exprimée en centimètres.
- Le poids, en kilogrammes, obtenu avec un pèse-personne.
- La masse grasse, en pourcentage, estimée à partir de la méthode des plis cutanés.

Cette méthode est basée sur la mesure de 4 plis cutanés (bicipital, tricipital, sous-scapulaire et sus-iliaque) pour une évaluation mathématique de la proportion du tissu adipeux dans l'organisme. La mesure des plis s'est effectuée avec une pince de Harpenden (Holtain Ltd., Crymych, U.K.).

3.4. Tests de terrain

Il existe deux tests d'évaluation des qualités physiques des spécialistes en canoë-kayak slalom sur le terrain. On distingue un test de 45 secondes et un test de 7 minutes. Tous deux ont été élaborés par le Docteur Gonzales de Suso (médecin des équipes nationales espagnoles de canoë-kayak) et J-M. Prono (entraîneur national kayak dame - équipe de France).

Les entraîneurs nationaux de canoë-kayak slalom utilisent ces tests dans le cadre du suivi des qualités physiologiques aérobies et anaérobies des athlètes.

3.4.1. Caractéristiques du plan d'eau et matériel

Les tests se déroulent sur un plan d'eau calme de largeur ou longueur supérieure à 200 mètres et d'1 mètre 50 de profondeur au minimum. Les parcours sont délimités par une ligne d'eau de 200 mètres inextensible, insubmersible et tendue en ligne droite à l'aide d'ancrages immersés. Le tracé (ligne d'eau) est balisé tous les 10 mètres avec un marquage différent à

intervalles de 50 mètres. Les embarcations utilisées lors des tests sont celles des compétitions slalom.

Afin de contrôler le degré d'implication dans l'effort, des cardiofréquencemètres individuels sont distribués aux athlètes. Parallèlement, chronomètres et caméras vidéos sont utilisés pour suivre le déroulement des épreuves (FFCK, 1999).

3.4.2. Test de 45 secondes

3.4.2.1. Protocole

Le but du test est de se propulser le plus rapidement possible pour couvrir le maximum de distance en 45 secondes le long de la ligne d'eau. La position de départ est immobile, corps au niveau de la bouée située à une des extrémités de la ligne d'eau. Le temps mis par l'athlète pour franchir chaque intervalle de 10 mètres est enregistré au centième de seconde toutes les fois que le corps (hanche) du pagayeur passe devant une balise, et ce, sur toute la distance parcourue.

La distance atteinte en 45 secondes est évaluée à l'aide des balises positionnées tous les 10 mètres, le corps du pagayeur servant de référence.

En raison des difficultés d'évaluation de la distance réelle développée, les entraîneurs s'appuient sur l'enregistrement vidéo pour effectuer leurs calculs (FFCK, 1999 ; Sivy, 2000 ; Cheutin, 2001).

3.4.2.2. Variables évaluées

Les entraîneurs ont répertorié un certain nombre de paramètres qui seraient susceptibles de les renseigner sur les qualités physiologiques anaérobies des slalomeurs :

- La distance réelle (en mètres) : elle équivaut à la distance atteinte en tenant compte des imprécisions dues aux erreurs de parallaxe à l'arrivée. C'est en fait une extrapolation de la distance à partir de la vitesse moyenne sur les 20 derniers mètres balisés.

- La vitesse moyenne (en m.s^{-1}) : elle est calculée sur l'ensemble du test. Elle indiquerait la capacité anaérobie de l'athlète.
- Le pic de vitesse (en m.s^{-1}) : relevé sur l'un des secteurs de 10 mètres, il est considéré comme étant la vitesse maximale du sujet. Sa valeur serait un indicateur de la puissance anaérobie.
- Le rapport, exprimé en pourcentage, entre le pic de vitesse et la vitesse moyenne des 20 derniers mètres serait un indice de fatigabilité de l'individu au cours du test (FFCK, 1999 ; Sivy, 2000).

3.4.3. Test de 7 minutes

3.4.3.1. Protocole

Le but est de réaliser le maximum de distance à une vitesse la plus régulière possible en tournant autours de la ligne d'eau pendant 7 minutes. Le départ s'effectue dans les mêmes conditions qu'au test de 45 secondes.

Des temps de passage sont pris tous les 400 mètres et la distance totale parcourue est évaluée à l'aide des balises positionnées tous les 10 mètres (FFCK, 1999 ; Sivy, 2000 ; Cheutin, 2001).

3.4.3.2. Variables évaluées

Quatre paramètres sont retenus pour effectuer une évaluation minimale et pertinente du profil aérobie des individus :

- La vitesse maximale aérobie (VMA) maintenue sur les 7 minutes (en m.s^{-1}).
- La distance maximale parcourue durant les 7 minutes (en mètres).
- Le pourcentage de la vitesse maximale aérobie relevé sur trois sections différentes de la distance réalisée (0-400m ; 400-800m et 800-arrivée).
- La $\dot{\text{V}}\text{O}_2 \text{ max indirecte}$ (en $\text{ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) (FFCK, 1999).

Le test de 45 secondes et le test de 7 minutes sont réalisés successivement le même jour avec un délai d'au moins 40 minutes entre les deux épreuves.

Il est important de signaler que certaines variables ont été croisées entre les deux tests. Par exemple le rapport, exprimé en pourcentage, entre le pic de vitesse au test de 45 seconde et la VMA sur 7 minutes sert à montrer le développement du potentiel anaérobie comparativement au potentiel aérobie de l'athlète. D'autre part le rapport entre la vitesse moyenne au test de 45 secondes et la VMA sur 7 minutes indique le développement de la capacité anaérobie par rapport au potentiel aérobie de l'individu (FFCK, 1999).

3.5. Démarche

Les données de laboratoire recueillies proviennent des travaux menés par le Centre de Médecine du Sport de Pau. Celles-ci ont été enregistrées et archivées tout au long du suivi des athlètes depuis une dizaine d'années.

Quant aux données de terrain, la Fédération Française de Canoë-Kayak possède des documents qui nous ont été transmis, après sollicitation, par les entraîneurs nationaux concernés.

Chacun des sportifs a eu un suivi individualisé aussi bien en laboratoire que sur le terrain. En effet sur les 18 dossiers traités au départ on pouvait constater que les différents athlètes, en majorité, n'ont pas été évalués au même âge, à la même période et avec le même niveau d'assiduité. Parmi les informations disponibles, il était donc nécessaire de ne choisir que celles qui nous permettraient de poursuivre cette étude.

A partir de l'ensemble des variables évaluées, voici celles qui ont été répertoriées :

- La taille (en cm), le poids (en kg) et le pourcentage de masse grasse à propos des mesures anthropométriques.
- La $\dot{V}O_2$ max (en $l.\min^{-1}$ et en $ml.kg^{-1}.\min^{-1}$) ainsi que les pourcentages de $\dot{V}O_2$ max relatifs aux seuils “aérobie” et “anaérobie” pour la mesure directe de $\dot{V}O_2$ en laboratoire.

- La puissance maximale anaérobie (en W et en $\text{W}.\text{kg}^{-1}$), la vitesse maximale (en $\text{rev}.\text{min}^{-1}$) et la force maximale (en kg) au cours du test force-vitesse.
- La puissance maximale anaérobie (en W et $\text{W}.\text{kg}^{-1}$), la puissance moyenne (en W et en $\text{W}.\text{kg}^{-1}$) et la vitesse maximale évaluées pendant le test de Wingate.
- Le pic de vitesse (en m.s^{-1}) et la distance réelle (en m) sur le test terrain de 45 secondes.
- La vitesse maximale aérobie (en m.s^{-1}), la distance (en m) et la $\dot{\text{V}}\text{O}_2$ max indirecte (en $\text{ml}.\text{kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) lors du test de 7 minutes sur le terrain.

La saisie des données s'est effectuée par informatique à l'aide du logiciel Excel (microsoft, 2000).

3.6. Analyse statistique

Pour chaque variable, la moyenne et l'écart type correspondant (E.T) ont été calculés.

La mesure des effets (physiologiques et anthropométriques) de l'activité canoë-kayak en fonction du temps (deux périodes) a été réalisée à l'aide d'un test de Wilcoxon. Les différences entre les moyennes du groupe "canoë" et du groupe "kayak" ont été déterminées pour les évaluations physiologiques et anthropométriques avec un test U de Mann-Withney. Enfin une matrice de corrélation a été obtenue par régression linéaire à partir des valeurs obtenues au cours des tests (laboratoire et terrain) des sujets. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Statistica. Une probabilité (p) d'une valeur <0.05 a été utilisée comme limite pour déclarer une différence statistique significative.

4. Résultats

La présentation des résultats s'articule en trois étapes. On distingue successivement :

- Les résultats statistiques concernant les mesures anthropométriques,
- Les résultats statistiques liés aux tests d'effort en laboratoire,
- Les résultats aux tests de corrélation entre les épreuves effectuées sur l'ergocycle Monark et les tests de terrain.

4.1. Caractéristiques anthropométriques

Dans un premier temps l'objectif est de chercher la différence qui pourrait apparaître entre les kayakistes et canoéistes pour l'ensemble des variables puis une seconde partie sera consacrée à l'étude de l'évolution des paramètres dans le temps, tous individus confondus.

4.1.1. Comparaison intergroupe

Le test statistique utilisé pour comparer les moyennes des populations canoéiste et kayakiste ne révèle aucune différence significative entre les groupes (voir TABLEAU 1 et FIGURE 1 annexe).

TABLEAU 1. *Données anthropométriques relatives aux groupes canoë et kayak.*

Paramètres	Canoë (<i>n=5</i>)	Kayak (<i>n=5</i>)
Taille (cm)	180.4 ± 3.1	181.2 ± 7.4
Poids (kg)	71.9 ± 2.7	74.1 ± 7.3
M.G (%)	10.2 ± 2.0	10.5 ± 1.1

Les valeurs désignent les Moyennes \pm E.T pour les variables *Taille* en centimètres; *Poids* en kilogrammes et *M.G* (masse grasse) en pourcentage.

n correspond à l'effectif de chacun des deux groupes canoë et kayak.

4.1.2. Evolution rapportée à l'âge

En faisant abstraction des catégories, l'analyse des variables anthropométriques sur trois tranches d'âge successives ne montre aucune évolution significative des paramètres abordés (voir TABLEAU 2 et FIGURE 2 annexe).

TABLEAU 2. *Evolution des paramètres anthropométriques avec l'âge.*

Paramètres	19/20 ans (n=7)	21/22 ans (n=9)	23/24 ans (n=7)
Taille (cm)	182.3 ± 4.4	183.8 ± 4.4	184 ± 4.5
Poids (kg)	73.4 ± 6.1	74.8 ± 5.4	72.2 ± 3.5
	19/20 (n=6)	21/22 (n=9)	23/24 (n=7)
M.G (%)	10.1 ± 1.8	10.6 ± 1.9	10.2 ± 2.6

Les valeurs désignent les Moyennes ± E.T pour les variables *Taille* en centimètres; *Poids* en kilogrammes et *M.G* (masse grasse) en pourcentage.

n est le nombre de valeurs à l'origine du calcul des moyennes.

4.1.3. Evolution rapportée à l'année

D'après l'analyse statistique de l'évolution sur deux périodes bi-annuelles successives, on observe, à l'échelle de la population, une augmentation significative du poids ($p<0.05$) alors que la taille et la masse grasse n'évoluent pas de manière significative. Les résultats sont présentés dans le TABLEAU 3 (voir FIGURES 3, 4 annexes).

TABLEAU 3. *Evolution des paramètres anthropométriques entre les périodes 1997-1998 et 1999-2000.*

Paramètres	1997/1998 (n=7)	1999/2000 (n=7)
Taille (cm)	181.1 ± 4.9	181.2 ± 4.9
Poids (kg)	73.4 ± 5.5	74.5 ± 5.7*
M.G (%)	10.9 ± 1.6	10.3 ± 1.4

Les valeurs désignent les Moyennes ± E.T pour les variables *Taille* en centimètres; *Poids* en kilogrammes et *M.G* (masse grasse) en pourcentage.

n représente le nombre de valeurs utilisées pour le calcul des moyennes sur chaque période.

*Différence significative entre les deux périodes, $p<0.05$

4.2. Tests de laboratoire

La description des résultats liés aux tests de laboratoire reprend la même logique que celle des caractéristiques anthropométriques.

4.2.1. Comparaison intergroupe

En ce qui concerne les paramètres physiologiques évalués en laboratoire au test de puissance maximale aérobie, au test de force-vitesse ainsi qu'au test de Wingate, aucune différence significative entre les deux groupes ne se dégage du traitement statistique pour l'ensemble des variables étudiées (voir TABLEAU 4 et FIGURES 5, 6, 7 annexes).

TABLEAU 4. *Données physiologiques relatives aux groupes canoë et kayak.*

Paramètres PMA	Canoë (n=5)	Kayak (n=5)
$\dot{V}O_2 \text{ max } (l.\text{min}^{-1})$	3.56 ± 0.49	3.62 ± 0.55
$\dot{V}O_2 \text{ max } (ml.\text{kg}^{-1}.\text{min}^{-1})$	49.54 ± 5.36	49.18 ± 4.76
% $\dot{V}O_2 \text{ max } SA$	66.51 ± 2.33	66.02 ± 13.42
% $\dot{V}O_2 \text{ max } SAn$	82.46 ± 1.28	79.58 ± 8.93
Paramètres FV	Canoë (n=5)	Kayak (n=5)
P Max (W)	1122.86 ± 98.93	1180.27 ± 65.85
P Max (W.kg ⁻¹)	15.48 ± 1.35	16.41 ± 2.2
F Max (kg)	17.34 ± 2.26	17.61 ± 1.42
V Max (rev.min ⁻¹)	262.21 ± 14.78	269.66 ± 15.76
Paramètres Wingate	Canoë (n=4)	Kayak (n=5)
P Max (W)	789.89 ± 34.35	858.16 ± 70.29
P Max (W.kg ⁻¹)	11.04 ± 0.52	11.51 ± 0.72
P Moy (W)	646.98 ± 32.48	672.89 ± 30.7
P Moy (W.kg ⁻¹)	9.03 ± 0.24	9.05 ± 0.71
V Max (rev.min ⁻¹)	170.16 ± 7.57	176.41 ± 11.47

Les valeurs désignent les Moyennes \pm E.T pour les variables aux différents tests.

PMA, puissance maximale aérobie; **FV**, force-vitesse; $\dot{V}O_2 \text{ max}$, consommation maximale d' O_2 exprimée en litres par minute et en millilitres par kilogramme par minute; % $\dot{V}O_2 \text{ max } SA$ et SAn , pourcentages de la consommation maximale d' O_2 relatifs respectivement aux seuils "aérobie" et "anaérobie"; $P \text{ Max}$, puissance maximale anaérobie exprimée en watts et en watts par kilogramme; $F \text{ Max}$, force maximale en kilogrammes; $V \text{ Max}$, vitesse maximale en révolutions par minute; $P \text{ Moy}$, puissance moyenne exprimée en watts et en watts par kilogramme.
n représente l'effectif des groupes canoë et kayak.

4.2.2. Evolution rapportée à l'âge

Le traitement statistique ne fournit aucun résultat significatif relatif à l'évolution sur trois tranches d'âge successives des différents paramètres appartenant aux tests de puissance maximale aérobie et de force-vitesse (se référer au TABLEAU 5 et FIGURES 8, 9 annexes).

TABLEAU 5. *Evolution des paramètres physiologiques avec l'âge aux tests de puissance maximale aérobie et de force-vitesse.*

Paramètres PMA	18/19 ans (n=6)	20/21 ans (n=7)	22/23 ans (n=6)
$\dot{V}O_2 \text{ max } (l.\text{min}^{-1})$	3.4 ± 1	3.8 ± 0.6	3.56 ± 0.44
$\dot{V}O_2 \text{ max } (ml.\text{kg}^{-1}.\text{min}^{-1})$	46.95 ± 8.7	50.96 ± 5.15	48.91 ± 4.36
	n=3	n=5	n=3
$\% \dot{V}O_2 \text{ max SA}$	70.32 ± 3.38	65.33 ± 6.86	69.14 ± 0.94
$\% \dot{V}O_2 \text{ max SAn}$	87.04 ± 4.58	77.92 ± 1.43	81.84 ± 3.39
Paramètres FV	19/20 ans (n=6)	21/22 ans (n=8)	23/24 ans (n=6)
$P \text{ Max } (W)$	1112.17 ± 174	1165.89 ± 178.05	1228.88 ± 57.18
$P \text{ Max } (W.kg^{-1})$	14.75 ± 2.36	15.62 ± 2.46	16.94 ± 0.78
$F \text{ Max } (kg)$	17.33 ± 3.92	17.91 ± 3.44	20.21 ± 1.67
$V \text{ Max } (\text{rev}.\text{min}^{-1})$	260.33 ± 19.75	263.15 ± 19.2	245.49 ± 25.04

Les valeurs désignent les Moyennes \pm E.T pour les variables aux différents tests.

PMA, puissance maximale aérobie; **FV**, force-vitesse; $\dot{V}O_2 \text{ max}$, consommation maximale d' O_2 exprimée en litres par minute et en millilitres par kilogramme par minute; $\% \dot{V}O_2 \text{ max SA}$ et SAn , pourcentages de la consommation maximale d' O_2 relatifs respectivement aux seuils "aérobie" et "anaérobie"; $P \text{ Max}$, puissance maximale anaérobie exprimée en watts et en watts par kilogramme; $F \text{ Max}$, force maximale en kilogrammes; $V \text{ Max}$, vitesse maximale en révolutions par minute.

n représente le nombre de valeurs utilisées pour le calcul des moyennes.

4.2.3. Evolution rapportée à l'année

D'un point de vue statistique, la vitesse maximale atteinte au test force-vitesse s'élève de manière significative d'une période à l'autre ($p<0.05$). Cependant ce résultat contraste avec l'ensemble des variables restantes liées au test force-vitesse ainsi qu'au test de puissance maximale aérobie pour lesquelles il n'y a aucune évolution manifeste. Les résultats sont rapportés dans le TABLEAU 6 ci après et illustrés par les FIGURES 10, 11, 12 annexes.

TABLEAU 6. Evolution des paramètres physiologiques entre deux périodes données aux tests de puissance maximale aérobie et de force-vitesse.

Paramètres PMA	1996/1997 (n=5)	1998/1999 (n=5)
$\dot{V}O_2 \text{ max } (l.\text{min}^{-1})$	3.68 ± 0.5	3.69 ± 0.55
$\dot{V}O_2 \text{ max } (ml.\text{kg}^{-1}.\text{min}^{-1})$	49.76 ± 3.38	49.34 ± 4.17
% $\dot{V}O_2 \text{ max } SA$	66.55 ± 2.97	68.86 ± 7.87
% $\dot{V}O_2 \text{ max } SAn$	81.3 ± 2.31	82.4 ± 7.6
Paramètres FV	1997/1998 (n=7)	1999/2000 (n=7)
P Max (W)	1142.9 ± 69.48	1196.57 ± 118.72
P Max (W.kg $^{-1}$)	15.6 ± 1.31	16.16 ± 1.84
F Max (kg)	18.02 ± 1.99	17.87 ± 2.68
V Max (rev.min $^{-1}$)	255.89 ± 15.2	$270.63 \pm 15.12^*$

Les valeurs désignent les Moyennes \pm E.T pour les variables aux différents tests.

PMA, puissance maximale aérobie; **FV**, force-vitesse; $\dot{V}O_2 \text{ max}$, consommation maximale d' O₂ exprimée en litres par minute et en millilitres par kilogramme par minute; % $\dot{V}O_2 \text{ max } SA$ et SAn , pourcentages de la consommation maximale d' O₂ relatifs respectivement aux seuils "aérobie" et "anaérobie"; $P \text{ Max}$, puissance maximale anaérobie exprimée en watts et en watts par kilogramme; $F \text{ Max}$, force maximale en kilogrammes; $V \text{ Max}$, vitesse maximale en révolutions par minute.

n représente le nombre de valeurs utilisées pour le calcul des moyennes.

*Différence significative entre deux périodes, p<0.05

4.3. Corrélations entre tests de laboratoire et tests de terrain

Dans le cas présent, l'étude de corrélation vise à souligner certains liens qui pourraient y avoir entre le contexte de laboratoire et celui du terrain. De ce fait nous avons couplé les tests en fonction de leurs caractéristiques. Ainsi deux catégories distinctes ont été constituées : les tests anaérobies (test de Wingate et test de 45 secondes) et les tests aérobies (test de puissance maximale aérobie et le test de 7 minutes).

4.3.1. Les tests anaérobies

Le TABLEAU 7 expose les différents coefficients de corrélation entre les variables choisies au test de wingate en laboratoire et celles sélectionnées au test de terrain de 45 secondes.

On constate qu'il y a forte relation entre la puissance maximale anaérobie relative développée sur l'ergocycle Monark et la distance parcourue sur l'eau au test de 45 secondes ($r=0,928$, p<0.05). On relève aussi un lien satisfaisant entre la puissance maximale anaérobie relative

atteinte au test de Wingate et le pic de vitesse enregistré au test de terrain ($r=0.886$, $p<0.05$).

Par ailleurs il existe également une relation significative entre la vitesse maximale évaluée en laboratoire et la distance couverte sur l'eau en 45 secondes ($r=0.847$, $p<0.05$).

En revanche la puissance maximale anaérobie absolue de laboratoire ne présente pas de relation significative avec la distance ainsi que le pic de vitesse calculés sur le terrain.

Néanmoins on remarque une tendance entre les deux pics de vitesse ($r=0.783$, $p<0.066$).

TABLEAU 7. Coefficients de corrélation entre les paramètres du test de Wingate et ceux du test de 45 secondes.

Test Wingate ($n=7$)		Test 45s ($n=7$)		Valeur de r
Paramètres	Moyenne ± E.T	Paramètres	Moyenne ± E.T	
$V Max L (rev.min^{-1})$	173.64 ± 9.75	$V Max T (m.s^{-1})$	3.45 ± 0.46	0.783
$V Max L (rev.min^{-1})$	173.64 ± 9.75	$D_{45s} (m)$	140.24 ± 15.77	0.847*
$P Max (W)$	822.5 ± 66.18	$V Max T (m.s^{-1})$	3.45 ± 0.46	0.665
$P Max (W.kg^{-1})$	11.27 ± 0.72	$V Max T (m.s^{-1})$	3.45 ± 0.46	0.886*
$P Max (W)$	822.5 ± 66.18	$D_{45s} (m)$	140.24 ± 15.77	0.76
$P Max (W.kg^{-1})$	11.27 ± 0.72	$D_{45s} (m)$	140.24 ± 15.77	0.928*

Le tableau rapporte les Moyennes ± E.T pour les variables aux différents tests; le r représente le coefficient de corrélation; n représente le nombre de valeurs utilisées pour le calcul des moyennes.

$V Max L$, vitesse maximale atteinte sur l'ergocycle Monark en révolutions par minute; $P Max$, puissance maximale anaérobie exprimée en watts et en watts par kilogramme; $V Max T$, pic de vitesse calculé sur le terrain en mètres par seconde et D_{45s} , distance parcourue en mètres lors du test de 45 secondes.

* $p<0.05$

4.3.2. Les tests aérobies

Lorsque l'on superpose les variables du test de puissance maximale aérobie en laboratoire à celles du test de 7 minutes mené sur le terrain, on ne distingue, d'un point de vue statistique, aucune corrélation significative. Les coefficients de corrélation obtenus figurent dans le TABLEAU 8.

TABLEAU 8. Coefficients de corrélation entre les paramètres du test de PMA et ceux du test 7 minutes.

Test PMA (<i>n</i> =6)		Test 7' (<i>n</i> =6)		Valeur de <i>r</i>
Paramètres	Moyenne ± E.T	Paramètres	Moyenne ± E.T	
$\dot{V}O_2L$ ($ml.kg^{-1}.min^{-1}$)	49.99 ± 7.36	$\dot{V}O_2T$ ($ml.kg^{-1}.min^{-1}$)	54.94 ± 9.8	0.406
$\dot{V}O_2L$ ($ml.kg^{-1}.min^{-1}$)	49.99 ± 7.36	$D_{7'} (m)$	1064.67 ± 63.26	0.406
$\dot{V}O_2L$ ($ml.kg^{-1}.min^{-1}$)	49.99 ± 7.36	$VMA_{7'}(m.s^{-1})$	2.54 ± 0.15	0.405
$\dot{V}O_2L$ ($l.min^{-1}$)	3.62 ± 0.51	$\dot{V}O_2T$ ($ml.kg^{-1}.min^{-1}$)	54.94 ± 9.8	0.138
$\dot{V}O_2L$ ($l.min^{-1}$)	3.62 ± 0.51	$D_{7'} (m)$	1064.67 ± 63.26	0.137
$\dot{V}O_2L$ ($l.min^{-1}$)	3.62 ± 0.51	$VMA_{7'}(m.s^{-1})$	2.54 ± 0.15	0.136

Le tableau rapporte les Moyennes ± E.T pour les variables aux différents tests; le *r* représente le coefficient de corrélation; *n* représente le nombre de valeurs utilisées pour le calcul des moyennes.

$\dot{V}O_2L$, consommation maximale d' O_2 de laboratoire exprimée en litres par minute et en millilitres par kilogramme par minute; $\dot{V}O_2T$, consommation maximale d' O_2 de terrain en millilitres par kilogramme par minute; $D_{7'}$, distance couverte et $VMA_{7'}$, vitesse maximale aérobie en mètres par seconde.

5. Discussion

Ce travail consistait à analyser, de manière rétrospective, les paramètres physiologiques d'une population de haut niveau en canoë-kayak slalom examinée sur plusieurs années. Afin de mener à bien cette étude, la recherche d'un échantillon adéquat (au sens d'un collectif stable évalué dans le temps au même moment selon le ou les même(s) objectif(s)) était prioritaire. Ainsi, parmi les 18 sportifs recensés à l'origine, nous n'avons pas retenu les kayakistes féminines en raison du manque d'effectif (3 dossiers sur les 18 disponibles), du nombre de tests et de la différence trop importante entre les sujets en terme de période d'évaluation. Il en est de même pour 5 individus masculins dont les données impliquaient des paramètres pouvant être préjudiciable pour l'étude : deux sujets ont été suivis pendant la phase pubertaire et les trois autres n'ont eu qu'une session de test. C'est pourquoi la population ayant servi de support à l'étude se composait de 10 athlètes distingués par spécialité (respectivement, 5 individus canoéistes et 5 kayakistes). Sachant que certains de ces sportifs ont été évalués dès l'adolescence, nous étions dans l'obligation de limiter les facteurs de croissance. En réponse à cela, la taille était le seul indice de maturation à disposition pour choisir arbitrairement une période de suivi. Afin de collecter suffisamment de données, un âge initial de 18 ans a été déterminé après observation d'un seuil de croissance à cet âge. Une fois ce critère atteint, l'analyse des paramètres physiologiques s'est développée selon trois formes : une démarche comparative entre les groupes canoë et kayak, une démarche longitudinale pour observer l'évolution des variables dans le temps et une démarche comparative entre deux milieux : le laboratoire et le terrain.

5.1. Caractéristiques physiologiques

Les caractéristiques physiologiques regroupent les données anthropométriques et les données des différents tests de laboratoire. D'après les résultats anthropométriques et ceux obtenus lors des tests effectués sur l'ergocycle Monark, on observe aucune différence physiologique entre les populations canoéiste et kayakiste (voir TABLEAUX 1 et 4). Certes les données

anthropométriques des deux groupes se ressemblent mais les contraintes biomécaniques propres à chaque spécialité ne mobilisent pas les groupes musculaires de la même façon. Cela suggère qu'un test de laboratoire effectué sur un ergocycle adapté aux membres supérieurs est indépendant de la spécificité du geste sportif.

La comparaison de l'échantillon étudié ($n=10$) à d'autres populations pratiquant le canoë-kayak est nécessaire pour situer le profil physiologique des slalomeurs de haut niveau.

La $\dot{V}O_2 \text{ max}$ est l'un des paramètres exploitables pour réaliser cette comparaison.

Lorsqu'elle est exprimée en $l.\text{min}^{-1}$ d' O_2 , la $\dot{V}O_2 \text{ max}$ représente, chez les 5 kayakistes de haut niveau sélectionnés, une valeur supérieure de 11% à celle obtenue sur ergomètre dans une population senior très entraînée de même spécialité (Carré et al., 1994). En revanche lorsque la $\dot{V}O_2 \text{ max}$ est rapportée au poids de corps, la différence entre ces deux groupes est réduite à 2%. Ainsi pour une $\dot{V}O_2 \text{ max}$ relative identique, l'élite atteindrait une $\dot{V}O_2 \text{ max}$ absolue plus élevée que les athlètes de niveau moindre. On supposerait que la masse musculaire joue un rôle dans ce résultat. En effet le poids moyen des kayakistes de haut niveau dépasse de 10% celui des individus testés dans l'étude pré-citée (respectivement, 74,1 kg contre 66,7 kg).

Par ailleurs il est également enrichissant de pouvoir s'appuyer sur une comparaison physiologique entre les données de courses en ligne et le slalom. Il existe, en terme de $\dot{V}O_2 \text{ max}$, une différence de 11% en faveur de kayakistes de course en ligne de niveau national par rapport aux valeurs relevées dans la présente étude concernant l'élite kayakiste en slalom (Billat et al., 1996 ; Faina et al., 1997). En dépit d'une différence de niveau entre les deux groupes, une sollicitation plus importante de la voie aérobie semble caractériser le kayak de course en ligne. Toutefois la population étudiée était spécialiste de l'épreuve de 1000m. Pour cette raison on ne peut généraliser à l'ensemble des distances de course en ligne. Il s'avère, en effet, que les processus anaérobies occupent une place non négligeable dans les compétitions les plus courtes (Tesch et al., 1975 ; Zamparo et al., 1999). Par

conséquent il est possible que la $\dot{V}O_2$ max des slalomeurs de haut niveau et celle des athlètes de course en ligne se rapprochent si la distance en course en ligne diminuait.

5.2. Evolution des paramètres physiologiques dans le temps

La population a été suivie dans son ensemble pour rendre compte de l'évolution des paramètres physiologiques par rapport à l'âge et à l'année. Les variables sélectionnées ont été organisées par périodes et par tranches d'âge pour satisfaire à certaines exigences statistiques. L'observation de l'évolution par rapport à l'âge considère l'évolution, dans le temps, de la population d'un âge à un autre. Par contre l'évolution de la population par rapport à l'année est analysée à partir du suivi des individus au même moment et non plus au même âge ; c'est un groupe de catégories (junior+espoir+senior) que l'on observe en même temps. Ainsi la difficulté de déceler une évolution dans les deux cas (voir respectivement, TABLEAUX 2 et 5 puis 3 et 6) s'expliquerait par le fait que les slalomeurs de haut niveau, après 18 ans, tendent vers une maturation et ont une progression de performance physiologique minime qui n'apparaît pas statistiquement.

5.3. Corrélations

La comparaison entre les performances enregistrées en laboratoire et sur le terrain était un choix fortement influencé par la qualité des corrélations obtenues entre ces deux milieux d'après les études menées en course en ligne et en slalom (Van Someren et al., 2000 ; Carré et al., 1994).

La superposition des tests anaérobies (test de Wingate et test de 45 secondes) montre que la puissance maximale en $W.kg^{-1}$ et la vitesse maximale de pédalage mesurées sur l'ergocycle Monark sont en corrélation étroite avec la distance réalisée sur le terrain. De plus la puissance maximale relative est également corrélée au pic de vitesse relevé sur le terrain (voir TABLEAU 7). Nous en déduisons que la puissance rapportée au poids de corps ainsi que la vitesse de pédalage sont des paramètres déterminants de la performance de terrain sur un

effort maximal de 45 secondes. Donc un slalomeur très qualifié ayant une puissance relative et une vélocité les plus élevées en laboratoire est susceptible d'être le plus rapide sur l'eau.

Quant à l'évaluation des qualités physiques aérobies, on ne trouve aucun lien entre le test de PMA en laboratoire et le test de 7 minutes sur le terrain (voir TABLEAU 8). Ce constat infirme les résultats obtenus auparavant en slalom qui attestent d'une forte relation entre la $\dot{V}O_2$ max mesurée directement sur ergomètre et celle estimée par rétro-extrapolation sur le terrain ($r=0.89$, $p<0.0001$) (Carré et al., 1994). Il est possible que la méthodologie employée soit à l'origine de la divergence des résultats. En effet dans l'étude pré-citée les auteurs demandent à l'athlète de suivre un protocole incrémental aussi bien en laboratoire qu'en bassin pour déterminer la $\dot{V}O_2$ max dans chacun des cas. Or, dans la présente étude, seules les conditions de mesure directe proposent ce type de protocole ; l'épreuve de terrain sollicitant un effort constant et intense de 7 minutes dont la gestion est attribuée à l'athlète lui-même. Ainsi la situation de terrain requiert un investissement physique autonome sur 7 minutes alors que le test incrémental de laboratoire guide l'effort de l'individu. Pour illustrer cette différence, il serait intéressant de se baser sur une réflexion antérieure portant sur la notion d'autonomie liée au test de 7 minutes (Sivy, 2000). D'après cet auteur, il semblerait que ce test repose beaucoup sur les sensations du sportif. De ce fait le contrôle subjectif du rythme ne serait pas assez rigoureux. Pour y remédier, peut être alors que la réalisation du test de 7 minutes nécessite un temps d'apprentissage et d'adaptation. Il est possible que cela puisse, par la suite, développer l'expérience du sujet et améliorer la qualité de ses mesures. Finalement on peut formuler l'hypothèse qu'un test de terrain incrémental serait plus pertinent pour renforcer les corrélations entre le laboratoire et le terrain en ce qui concerne l'évaluation des qualités aérobies du slalomeur.

Conclusion

L'approche rétrospective est, dans cette étude, un moyen de rechercher les caractéristiques physiologiques de canoë-kayakistes de haut niveau en slalom évalués sur plusieurs années. Les observations qui sont rapportées à ce sujet nécessitent quelques remarques.

Tout d'abord le suivi individualisé des athlètes à l'origine de l'étude physiologique longitudinale est estimé moins avantageux que ne l'aurait été un suivi collectif. En effet la cohérence du groupe est en réalité un élément essentiel pour les besoins d'une telle analyse qui exige une même population, au même moment, avec les mêmes tests. De ce fait on peut suggérer qu'un suivi synchronisé des sportifs sur une période donnée permettrait d'étudier un effectif plus important d'individus. Par ailleurs il est regrettable qu'il n'y ait pas d'analyse chez les kayakistes féminines. Pour mener cette étude un recueil de données plus conséquent serait particulièrement indispensable.

L'étude du profil physiologique des slalomeurs de haut niveau montre que ces sportifs mobilisent moins la filière aérobie que les spécialistes de course en ligne. Pour autant la comparaison de l'élite en slalom à d'autres populations canoë-kayakistes ne nous renseigne pas sur la part respective des facteurs aérobies et anaérobies en compétition de slalom.

Plutôt que l'analyse comparative, il est possible qu'une analyse de corrélation entre les épreuves de laboratoire, celles de terrain et les résultats sportifs en slalom puisse fournir un élément de réponse. Dans un premier temps il faut rappeler que l'étude de la relation entre les tests anaérobies adaptés aux slalomeurs (test de Wingate et test de 45 secondes) est très encourageante au vu des résultats. D'autre part il se pourrait que l'absence de corrélation entre les tests aérobies (test de PMA et test de 7 minutes) justifie la proposition récente d'une alternative en matière de test (Sivy, 2000). On se souvient que cet auteur a développé un test incrémental sur l'eau destiné à évaluer la capacité aérobie (test 3min d'effort-3min de repos). Le protocole semble intéressant mais nécessite d'être validé. C'est pourquoi il a été suggéré

de corréler ce test avec l'épreuve de PMA en laboratoire. Donc la recherche de l'adéquation entre ces deux tests serait l'occasion de vérifier si un test incrémental de terrain et de laboratoire évaluent les mêmes qualités physiques.

C'est peut être en confrontant ensuite toutes ces données à celles de la réalité sportive que l'on peut espérer déterminer les paramètres physiologiques impliqués en compétition de canoë-kayak slalom.

Bibliographie

- **Astrand P-O. et Saltin B.**, “*Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity*”, J. Appl. Physiol., 1961; 16: 977-981.
- **Astrand P-O. et Rodahl K.**, “*Précis de physiologie de l'exercice musculaire*”, traduction française de l'ouvrage publié sous le titre “*Textbook of work physiology*”, ed. Masson, Paris, 1994, p. 292.
- **Billat V., Faina M., Sardella F., Marini C., Fanton F., Lupo S., Faccini P., De Angelis M., Koralsztein J-P. et Dal Monte A.**, “*A comparison of time to exhaustion at $\dot{V}O_2 \text{ max}$ in élite cyclists, kayak paddlers, swimmers and runners*”, Ergonomics, 1996 ; 39(2) : 267-277.
- **Carré F., Dassonville J., Beillot J., Prigent J-Y. et Rochcongar P.**, “*Use of oxygen uptake recovery curve to predict peak oxygen uptake in upper body exercise*”, Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol., 1994; 69(3): 258-261.
- **Cheutin J-Y.**, “*Contenus d'entraînement et tests en canoë-kayak slalom*”, Mémoire Diplôme Universitaire “*Evaluation et préparation physique*”, Université Bordeaux II, 2001, pp. 8-10 et 31-32.
- **Faina M., Billat V., Squadrone R., De Angelis M., Koralsztein J-P. et Dal Monte A.**, “*Anaerobic contribution to the time to exhaustion at the minimal exercise intensity at which maximal oxygen uptake occurs in élite cyclists, kayakists and swimmers*”, Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol., 1997; 76(1): 13-20.
- **Fédération Française de Canoë-Kayak**, Communications internes, 1999.
- **Flandrois R.**, “*Exploration du métabolisme aérobie*”, in : “*Médecine du sport pour le praticien*”, Monod H., Amoretti R. et Rodineau J., ed. Masson, Paris, 1994, pp. 67-72.
- **Fry R-W. et Morton A-R.**, “*Physiological and kinanthropometric attributes of elite flatwater kayakists*”, Med. Sci. Sports Exerc., 1991; 23(11): 1297-1301.
- **Harichaux P. et Medelli J.**, “*Tests d'aptitude et tests d'effort*”, ed. Chiron, série “*Sport Pratique*”, 2002, p. 75.

- **Lampert E., Bigard X., Carré F., Richard R. et Vallier J-M.**, “*Erreurs à ne pas commettre lors de la réalisation d'un exercice de détermination de la consommation maximale d'oxygène*”, Science et Sports, 1998 ; 13(4) : 193-201.
- **Léger L-A., Seliger V. et Brassard L.**, “*Backward extrapolation of $\dot{V}O_2$ max values from the O_2 recovery curve*”, Med Sci. Sports Exerc., 1980; 12(1): 24-27.
- **MacMahon S. et Jenkins D.**, “*Factors affecting the rate of phosphocreatine resynthesis following intense exercise*”, Sports Med., 2002; 32(12): 761-784.
- **Monod H. et Flandrois R.**, “*Physiologie du sport*”, ed. Masson, coll. Médecine du sport, p. 31 et 33.
- **Shephard R-J.**, “*Science et médecine du canoë et du kayak*”, publié en anglais sous le titre “*Science and medecine of canoeing and kayaking*”, Sports Med., 1987 ; 4(1) : 19-33, traduit par Pérès G. (éditeur scientifique), Fédération Française de Canoë-Kayak (diffuseur), Lyon, 1987, 19 pages.
- **Sivy J-Y.**, “*Tests d'évaluation et préparation physique pour le canoë et le canoë-kayak en eaux vives slalom*”, Mémoire Diplôme d’Université “Evaluation et préparation physique”, Université Bordeaux II, 2000, pp. 9-11 et 13.
- **Société Française de Médecine du Sport**, “*Erreurs à ne pas commettre lors de la détermination de la consommation maximale d'oxygène*”, in : “*Positions de consensus de la Société française de médecine du sport*”, Conférence de consensus, Science et Sports, 1999 ; 14(1) : 3-8 ; pp. 7-8.
- **Tesch P., Piehl K., Wilson G. et Karlsson J.**, “*Bases physiologiques du canoë et du kayak*”, publié en suédois sous le titre “*Kanot*”, traduit par Robin M. et Pérès G. (éditeur scientifique), Fédération Française de Canoë-Kayak (diffuseur), Lyon, 1975, pp. 12-13 et 16-17.
- **Vandewalle H., Pérès G. et Monod H.**, “*Relation force-vitesse lors d'exercices cycliques réalisés avec les membres supérieurs*”, Motricité humaine, 1983; 1(2) : 22-25.

- **Van Someren K-A., Phillips G-R-W. et Palmer G-S.**, “*Comparison of physiological responses to open water kayaking and kayak ergometry*”, Int. J. Sports Med., 2000; 21(3): 200-204.
- **Wasserman K., Whipp B-J., Koyal S-N. et Beaver W-L.**, “*Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise*”, J. Appl. Physiol., 1973; 35(2): 236-243.
- **Zamparo P., Capelli C. et Guerrini G.**, “*Energetics of kayaking at sub-maximal and maximal speeds*”, Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol., 1999; 80(6): 542-548.

