

UNIVERSITE DE POITIERS
FACULTE DES SCIENCES DU SPORT & DE MEDECINE-PHARMACIE

DIPLOME DE MASTER EN SCIENCES DE LA SANTE ET DU SPORT

Mention « Sport, Santé, Société »

**Spécialité :Ingénierie de la rééducation du handicap et de la performance motrice
(IRHPM)**

**Etude des sollicitations cardiaques en catamaran de sport
(Junior et Olympique).**

**Au service d'une analyse technologique et anthropologique de
la filière catamaran de sport.**

Moana VAIREAUX

Sous la direction de :

Mr Franck LECOMTE Ecole Nationale de Voile.

Mr Arnaud Guével UFR STAPS de Nantes

Septembre 2006.

REMERCIEMENTS

Remerciements, à Mr Christophe DEBOVE, directeur de l'Ecole Nationale de Voile, d'avoir mis à ma disposition le matériel et la structure nécessaire à ma recherche.

Remerciements, à Mr Franck LECOMTE, professeur à l' Ecole nationale de Voile, pour son aide et son orientation, dans la conduite de ce travail.

Remerciements, à Mr Philippe NEIRAS, entraîneur national à la Fédération Française de Voile, pour son aide dans le suivi logistique des mesures.

Remerciements, à Mr Yves CLOUET, professeur à l' Ecole nationale de Voile, pour son aide dans le suivi logistique des mesures.

Remerciements, à Isabelle et Florence, du centre de ressource de l'Ecole Nationale de Voile, pour leurs aides et leurs conseils.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	p3
1. Approche physiologique de l'exercice	p4
a. Comparaison de cas en voile olympique	p4
b. Cas particulier du catamaran de sport	p5
c. Cas des séries HC16, F18 et Tornado	p6
2. Fréquence cardiaque et exercice physique	p8
a. Validité de la FC comme indicateur du degré de sollicitation physique	p8
b. Facteurs de variation de la FC	p9
3. Mise en évidence de la problématique	p11
a. Intérêt de l'étude	p11
b. Réflexion sur la préparation physique en catamaran	p11
SUJET ET PROBLEMATIQUE	p12
MATERIEL ET METHODE	p13
1. Structure et intervenants	p13
a. L'ENV	p13
b. Les intervenants	p13
2. Population expérimentale	p14
a. Données anthropométriques	p14
b. Données physiques	p14
3. Matériel	p15
a. Appareillage de mesure de FC	p15
b. Mesure des conditions climatiques	p16
4. Procédure	p16
a. Zone et période d'acquisition	p16
b. Modalités de fonctionnement	p17
c. Gammes de vent	p18
RESULTATS	p19
1. Comparaison des variables support et poste selon le vent	p19
a. Résultats numériques	p20
b. Courbes de comparaisons	p20

2. Comparaison des variables allure et manœuvre	p21
a. Allures	p22
b. Manœuvres	p22
3. Analyses et statistiques	p23
a. Test de Kolmogorov-Smirnov	p23
b. Test de corrélation paramétrique de Pearson Vent / FCR	p23
c. Tests paramétriques de Student indépendants	p24
DISCUSSION	p27
1. Retour sur la problématique	p27
2. Interprétation des résultats	p27
a. Relation causale de la corrélation FCR / vent	p27
b. Conséquence des influences techniques et mécaniques des supports sur la cinétique cardiaque	p28
c. Répercussion de la différenciation des rôles sur les exigences physiques des sujets	p29
d. Prémisses d'une étude sur l'alternance des allures près / portant . . .	p30
e. Réflexion sur la place des sollicitations cardiaques en catamaran dans la hiérarchie des séries olympiques	p31
3. L'aspect physiologique au sein des déterminants de la performance olympique en Tornado	p32
a. Pondération de l'entraînement physique en voile	p32
b. Cas de la filière catamaran	
4. Intérêt de la pratique transitoire en F18.	p36
a. Au travers des contraintes physiques et anthropométriques	
b. Au niveau financier et fédéral	
5. Critiques à l'égard de perspectives technologique et qualitative p37	
a. Validité de la FC comme indicateur du degré de sollicitation physique	p37
b. Evaluation des contraintes musculaires et traumatismes posturaux	p38
c. Achèvement du profil type	p39
CONCLUSION	p39
BIBLIOGRAPHIE	p40
ANNEXES	

INTRODUCTION

De nombreuses études physiologiques existent en voile. La synthèse des variables mesurées et les principales conclusions sont dans le Tableau n°1 ci-dessous. La plupart de ces travaux sont soit en Laser, soit en planche à voile ou encore sur la position de rappel¹.

Les résultats sont variés selon le type de support, les mesures et les modalités de navigation. Les conclusions peuvent logiquement paraître contradictoires, d'autant plus qu'il y a peu d'études effectuées en réelles conditions de navigation [1,10] (particulièrement sur des parcours et des durées d'exercices se rapprochant au maximum de ceux de la compétition).

La pertinence de notre étude se définit en premier lieu par la prise en compte de la variabilité des conditions de navigation (force du vent et état de la mer). Deuxièmement par une durée de mesure importante reproduisant le plus possible les conditions de compétition. Et en dernier lieu, par le fait qu'à ce jour aucune étude n'a encore été réalisée en catamaran.

Support	N°	Date	Variables mesurées	Conclusions
Laser	1	2002	FC, Glycémie, Cortisol Testostérone	La voile est une activité à moins de 50 % de VO ₂ max sauf si les conditions deviennent difficiles.
	9	1996	VO ₂ , FC	44 % de VO ₂ max et 133 Bpm. Donc activité aérobie modérée.
	10	2004	VO ₂ , FC de réserve, Lactate	Sollicitation aérobie supérieure par rapport à d'autres articles. Validité de la FC de réserve comme témoin de l'O ₂ consommée.
	2	1994	VO ₂ , P ^o A, Lactate	Faible sollicitation sauf en cas de rappel important.
Planche à voile	9	1996	VO ₂ , FC	70 % de VO ₂ max et 90 % de FC max. Forte sollicitation aérobie et parfois anaérobie.
Position de rappel statique ou dynamique	3	1996	Endurance en situation de rappel. VO ₂ max Résistance des muscles des bras et du tronc.	La consommation de VO ₂ chez les élites en voile égale les autres sports.
	8	1996	EMG quadriceps, VO ₂ , FC, Lactate	Lien entre fatigue du quadriceps et ventilation
Rappel en navigation	4	1999	VO ₂ , FC, P ^o A, Lactate, Débit cardiaque	Faible coût énergétique mais augmentation importante de FC P ^o A et débit cardiaque (contraction isométrique importante).
	5	1999	Etude vidéo sur les sollicitations musculaire.	Plus de sollicitation au près et dans les manœuvres.

Tableau n°1 : Synthèse des études relevées dans la littérature.

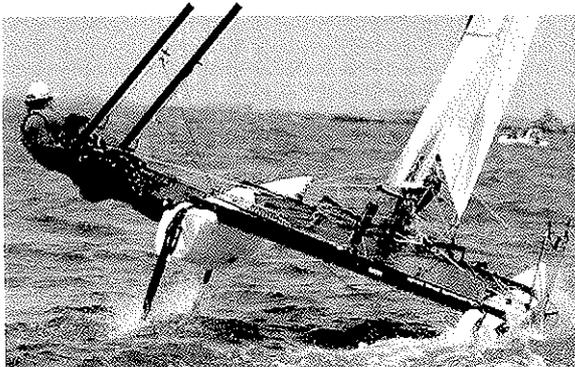
¹ Opposition du poids du corps à la force aérodynamique.

La spécificité du catamaran par rapport aux autres supports qui ont été plus souvent étudiés, est que les pratiquants adoptent une position dite « au trapèze » distincte de la position de « rappel » en dériveur ou de la position debout en planche à voile. Les contraintes et gestes sont différents en catamaran et doivent être décrits de manière précise.

1. Approche physiologique de l'exercice :

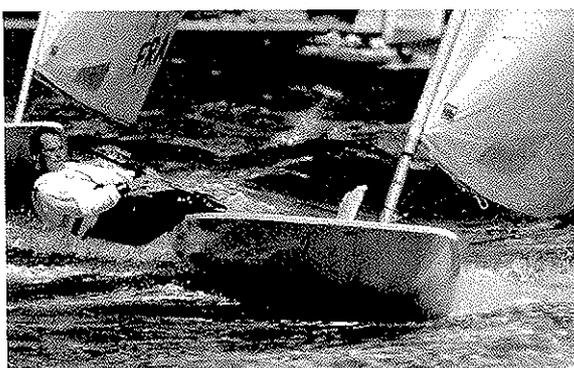
a. Comparaison de cas en voile olympique:

▪ Position de trapèze en catamaran :



C'est une position de suspension au bout d'un câble (ici en noir) qui permet d'amplifier le bras de levier et maintenir le bateau à l'horizontale. Le soutien du corps et du dos se fait grâce à une ceinture de trapèze, atténuant en partie la participation des abdominaux.

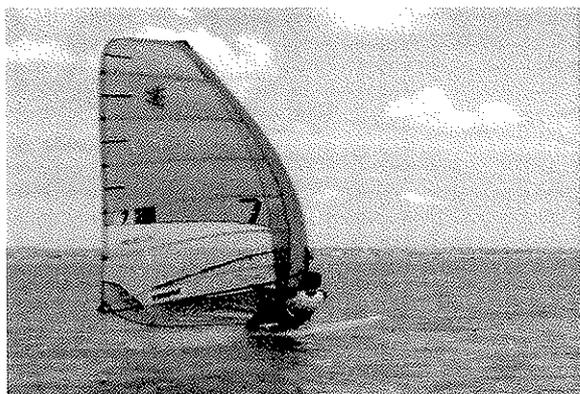
▪ Position de rappel en laser :



C'est une position d'appui sur le bord de la coque, les pieds crochetés dans des sangles, où l'objectif est de s'opposer à la force aérodynamique en maintenant le corps le plus à l'extérieur possible. Cette position est communément appelée « hiking » dans la littérature [3, 5, 8, 7, 26].

La différence essentielle se situe dans la manière dont le poids du corps est maintenu. Ce qui suppose une plus forte sollicitation des quadriceps et abdominaux en Laser (ou autres dériveurs qui requièrent le « rappel »).

▪ **Position en Planche à voile :**



C'est une position debout où la transmission de la force aérodynamique de la voile se fait directement au pratiquant qui la diffuse à l'identique au flotteur . Les efforts sont de ce fait élevés et répartis sur le haut et sur le bas du corps.

De ces trois supports, la planche à voile est celui qui requiert le plus de préparation et d'aptitudes physiques [6].

Dans les équipes de France actuelles de Laser et planche à voile, la préparation physique est prépondérante et a beaucoup évolué [6]. Ceci notamment grâce aux nombreuses études qui ont été réalisées sur ces supports. Par conséquent, un autre objectif de ce travail sera de déterminer la place de la préparation physique en catamaran.

Après cette approche générale en voile olympique, je vais exposer plus distinctement les gestes ou actions de l'exercice en catamaran.

b. Cas particulier du catamaran de sport:

Comme souligné précédemment, la position de trapèze n'induit pas une sollicitation musculaire importante, du fait de la suspension du corps. Elle nécessite cependant un gainage des jambes, des fessiers et des abdominaux pour entretenir une position la plus horizontale possible (le but étant d'éloigner le centre de gravité du bateau pour amplifier le couple de redressement). Les pieds doivent être joints et l'objectif est de se grandir au maximum en préférant une position « sur la pointe des pieds ». Ce principe engendre une déstabilisation latérale croissante avec la dégradation des conditions de mer et de vent.

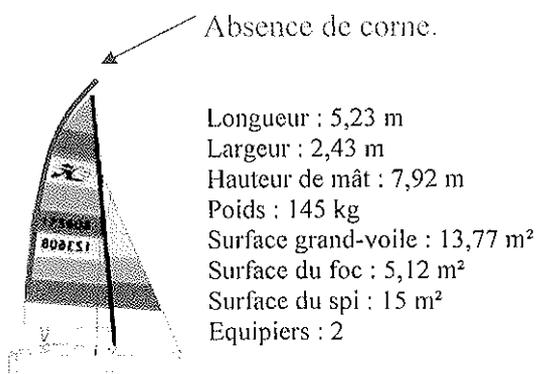
Conjointement, l'exercice musculaire lors des réglages ou manœuvres demande un investissement physique supérieur [2, 5]. En voile, chaque modification de direction du bateau exige un réglage ajusté des voiles et de la position de l'équipage. Le catamaran, du fait de sa puissance (envergure du bateau), tolère de grandes surfaces de voile. La vigueur musculaire à développer, planche à voile mise à part, est la plus haute par rapport aux autres séries olympiques, monocoques. Le profil type des équipiers en est un bon indicateur puisqu'il reflète une masse musculaire et des capacités physiques supérieures au

barreur². Ce qui nous conduit à émettre l'hypothèse, préalablement à l'analyse des mesures, d'une charge physique plus grande pour les équipiers en comparaison aux barreurs.

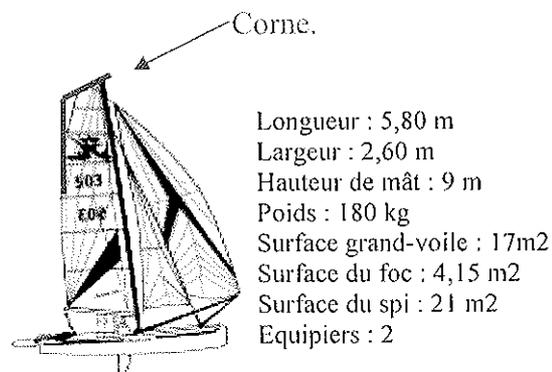
L'objet de cette étude se destine à l'ensemble de la filière catamaran et spécialement à la mise en évidence des différences entre le support jeune : HC16 (Hobie Cat 16) et le support olympique : Tornado. Attachons nous d'abord à faire ressortir les spécificités de chacun des supports.

c. Cas des séries HC16, F18 et Tornado :

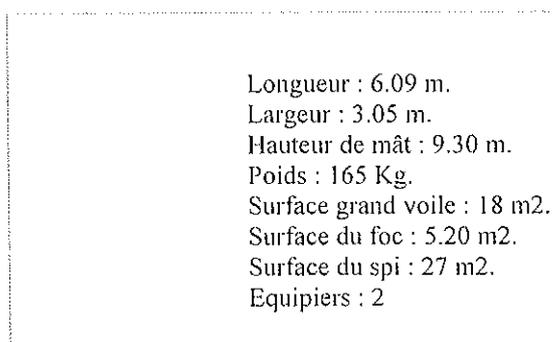
Le HC16 : (Série jeune)



Le F18 : (série espoir)



Le Tornado : (Série olympique)



Mât + barres de flèches + câbles.



² Se reporter à l'annexe 1 qui détaille les caractéristiques anthropologiques et physiques des sujets.

Caractéristiques		HCl16	F 18	Tornado	Remarques
Gréement	Surface (m ²)	13,8 (GV); 5,1(foc); 15(spi)	17 (GV); 4,2(foc); 21(spi)	18(GV); 5,2(foc); 27(spi)	Le spi double pratiquement sa surface du HC16 au Tornado.
	Forme	Sans corne, creuses.	Avec corne, plus plates.	Avec corne, plates.	La corne et la forme plate endurcissent le réglage.
	Tissu	Dacron (rigidité faible)	Pentex (rigidité forte)	Pentex (rigidité forte)	Endurcit le réglage.
Plate-forme	Mât	Aluminium 7, 9m sans barres de flèches.	Aluminium 9m avec barres de flèches	Carbone 9,3m avec barres de flèches	Les barres de flèches et le carbone endurcissent le réglage
	Tension du gréement.	Très faible	Forte	Très forte	Joue sur la transmission des forces propulsives à la plate-forme.
	Longueur	5,23m (16 pieds)	5,80m (18pieds)	6,09m	
Plate-forme	Largueur	2,43	2,60	3,05	Influence directement la puissance en augmentant le couple de redressement de l'engin.
	Rigidité	Faible	Forte	Très forte	Augmente la vitesse.
	Poids	145	180	165	Augmente la vitesse.
Vitesse maximum	20 noeuds	25 noeuds	30 noeuds		
Puissance du bateau					Elève les exigences sur le sujet.
Sollicitation estimée de l'équipage					A une incidence sur les variations de FC des sujets.

Tableau n°2 : Caractéristiques ou jauge des différents supports.

Ce sont principalement la puissance et l'exigence du support qui vont déterminer le niveau de sollicitation de l'équipage. Ce tableau n°2 met en avant les évolutions techniques de la jauge du Tornado. Les exigences se situent au niveau des matériaux (tissu de voile, mât carbone), de la surface et forme de voile, de la rigidité générale du bateau et dans son rapport longueur / largeur. Ces aspects vont agir selon trois axes : accroissement de la force musculaire à développer pour garantir le réglage des voiles, déstabilisation des appuis en raison de la réactivité de l'engin, et enfin ajout d'une gestion de techniques supplémentaires.

Outre le fait de commenter la place de la préparation physique en catamaran de sport par rapport aux autres séries, il sera donc également intéressant d'étudier la place de celle-ci au sein même de la filière catamaran. Ceci pour présenter des évolutions qui répondent aux changements d'exigences qu'imposent les caractéristiques des trois bateaux.

2. Fréquence cardiaque et exercice physique :

a. Validité de la FC comme indicateur du degré de sollicitation physique:

Nous allons analyser la sollicitation physique grâce à un de ses indicateurs qui est la fréquence cardiaque (FC).

Lorsque des masses musculaires importantes sont mises en jeu, le niveau de FC est en relation étroite avec la consommation d'oxygène [12, 14, 15, 17] et singulièrement en voile [10] comme dans d'autres sports [20, 21]. Pourtant, cette relation ne se vérifie que pour des intensités d'effort d'un niveau suffisant, en dessous duquel l'instabilité du rythme cardiaque est influencé par les émotions, la position corporelle, le climat etc. La même relation peut aussi subir une inflexion lors de valeurs maximums. Ce qui est à la source d'incontestables controverses au regard de la validité de la mesure de la FC [16].

Dans un premier temps, la majorité des études [10, 12, 15, 17] s'accordent sur le fait qu'il est certainement plus significatif de considérer la fréquence cardiaque de réserve (FCR). Elle permet de minimiser les variables liées aux profils des sujets grâce à l'incorporation des FC_{repos} et FC_{max} [12]. Selon le Collège Américain de Médecine du sport (ACSM, 1990) il est encore plus adéquat d'utiliser la correspondance %VO₂ max = %FCR. Le calcul est le suivant : $\%FCR = 100 / [FC_{exercice} - FC_{repos}] / [FC_{max} - FC_{repos}]$.

Dans un deuxième temps il paraît important de définir une fourchette dans laquelle l'erreur commise sera la plus faible. Ces valeurs vont concerner l'activité du métabolisme aérobie qui a pour témoin la FC (Astrand 1994) [16]. Conformément à la littérature, la

concordance de la relation %FC / % VO₂ se situe : entre 30% et 90% de VO₂ max [14] ; entre 40% et 90% de FCmax [15] ; ou encore pour des montants de FC > 120 bpm [12]. T Bernard *et al* (1996) [12] ont exposé que pour un état transitoire d'exercice avec FC > 120 bpm : $\%VO_2 = 1,11 \%FCR - 11,16$. Si on considère une fourchette entre 30% et 90% de VO₂ max [14, 15] l'attribution est respectivement de 37% et 91% de FCR. Cette concomitance³ entre %VO₂ et %FCR apparaît également dans l'étude sur Laser de O. Castagna *et al* (2004) [10]. Dans un souci de conformité de mesure, nous allons uniquement prendre en compte les valeurs de FCR supérieures à 37%. Nous remarquerons par la suite que cette modalité va exclure automatiquement les mesures dans les vents faibles. Il s'avère donc pertinent de présenter la **FCR** suivant la **force du vent** [1, 10, 13, 24], le **support** [24] et le **poste à bord** [24]. Nous traiterons ensuite, grâce à de plus amples données, les effets de l'**allure** (près/portant) et des **manœuvres** sur la réponse cardiaque. Enfin, pour la validité et la comparaison des valeurs, il est fondamental de minimiser les autres facteurs de variations de la FC. Comprenant les différences interindividuelles, les conditions de mesures et les facteurs inhérents à la voile .

b. Facteurs de variation de la FC :

- **De manière globale :**

La cinétique de la FC n'est pas exclusivement la conséquence d'une activité physique et peut être perturbée par des facteurs endogènes (1) et exogènes(2).

(1) Anxiété et stress [13, 15, 21] : Le rythme cardiaque est régulé par les systèmes sympathique et parasympathique qui sont respectivement accélérateur ou freinateur de la FC. Le stress et l'anxiété sont à l'origine de changements hormonaux qui ont une action directe sur ces systèmes et augmentent la FC du sujet. De manière à limiter ce facteur de variation, toutes les mesures seront accomplies en entraînement et non en compétition.

La position allongée [15] favorise le retour veineux, le remplissage du cœur pendant la diastole et aboutit à une baisse réflexe de la FC. La position de « trapèze » occasionnerait donc une sous appréciation de la FC. Cependant, les participants de cette étude adoptent tous cette position en navigation ce qui permet une comparaison transversale selon les supports.

³ Coefficient de la droite proche de l

Le délai de mise en jeu de la filière aérobie nécessite de faire les mesures après la phase d'échauffement [15].

Comme décrit précédemment, les sollicitations en catamaran sont essentiellement occasionnées par le réglage et la manipulation des voiles. La position de « trapèze » requiert une dépense moindre des membres inférieurs par rapport à la position de « rappel ». Néanmoins, le catamaran se caractérise par une sérieuse mise en jeu des membres supérieurs, associée à un travail non négligeable des membres inférieurs dans l'équilibre et la participation aux gestes de réglages. Cette propriété nous oriente vers l'influence des territoires musculaires mis en jeu.

Le degré de sollicitation du système cardio-vasculaire, et indirectement de la FC, dépend du pourcentage de la masse musculaire mobilisée au cours d'une activité. Si on étudie un test triangulaire maximal de VO_2 max : une mise en jeu associant le travail du haut et du bas du corps (*rameur ou Tapis roulant*), provoquera des valeurs supérieures de VO_2 max par rapport à une sollicitation exclusive des membres inférieurs (*ergo cycle*) [13].

(2) La Température extérieure [12, 13, 21] influence la FC par l'intermédiaire de la thermorégulation qui est mécanisme coûteux en énergie. Les mesures ont été étendues sur trois mois, les variations sont : $T^\circ \text{ air} = 9^\circ (\pm 3,2)$; $T^\circ \text{ eau} = 6^\circ (\pm 1,2)$

Concernant le degré d'entraînement [12, 15], il est classiquement admis que la FCmax diminue de quelques battements chez les sujets entraînés. Les Tornadistes sont plus affûtés physiquement que les plus jeunes en HC16. Toutefois ce facteur est minimisé, comme celui de la différence d'âge [12, 13, 15, 17, 21], par le calcul de la FCR utilisant la FCrepos et la FCmax.

Comme aucun sujet féminin ne fait partie de l'étude, les variations dues au sexe ne sont pas à prendre en compte.

- **Spécifiquement à la voile :**

Les dimensions et le type de parcours seront normalisés comme décrit dans le chapitre matériel et méthode.

Concernant l'état de la mer, la zone de navigation lors des mesures a toujours été la baie de Quiberon (France département du morbihan). Le clapot se lève de manière homogène avec le vent, sa considération ira donc de paire avec la force du vent.

3. Mise en évidence de la problématique :

a. Intérêt de l'étude :

Au regard de cette première approche du sujet, nous avons souligné l'intérêt d'une étude des contraintes cardiaques en catamaran de sport, tant pour sa spécificité (puissance et position différente), que pour le défaut de données à ce jour dans la littérature.

D'autre part, il apparaît au vu du tableau n°2, que les exigences physiques requises par les diverses séries augmentent lors d'une carrière sportive en catamaran. Ce qui nous amène à émettre l'hypothèse d'une augmentation des sollicitations cardiaques de l'équipage.

Les catamarans étudiés se pratiquant en binôme, la définition des rôles suit un but purement fonctionnel qui vise la performance optimale de l'équipage. Un objectif additionnel sera d'expliquer les incidences de cette nécessité sur les exigences et profils physiques des pratiquants.

En dernier lieu, d'après sa jauge, le Formule 18 (F18) montre une dimension intermédiaire qui peut représenter une transition intéressante entre la pratique jeune en HC16 (16 / 19 ans) et la pratique olympique en Tornado (20 à 40 ans).

b. Réflexion sur la préparation physique en catamaran:

Les études sont abondantes parmi les séries Laser et planches à voile, sans doute grâce à la détermination de la prépondérance de l'aspect physique dans la performance des athlètes. En revanche pas ou peu d'études concernent le catamaran de sport. Nous nous sommes donc attachés à combler cette lacune. Nous intégrerons ensuite cette problématique nouvelle dans une réflexion plus générale sur l'activité voile, en déterminant de manière hiérarchique la place des sollicitations physiologiques de la série catamaran au sein des différents supports olympiques.

Et enfin, la masse corporelle, la taille, les capacités énergétiques et musculaires sont des critères de sélection des individus en voile. Il paraît donc intéressant d'estimer un profil type en Tornado, particulièrement pour fixer un objectif en débouché de la série jeune HC16.

SUJET ET PROBLEMATIQUE

SUJET: Etude des sollicitations cardiaques en catamaran de sport (Junior et Olympique). Au service d'une analyse technologique et anthropologique de la filière catamaran de sport.

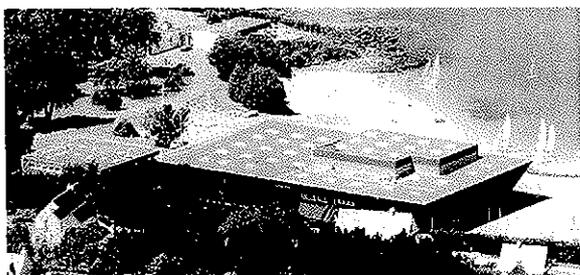
PROBLEMATIQUE: Comparer les exigences relatives aux supports pratiqués et analyser les répercussions des rôles au sein de l'équipage. Evaluer ensuite l'intérêt de l'entraînement physique et de la pratique transitoire en F18. Déterminer en filigrane un profil type des coureurs en Tornado.

MATERIEL ET METHODES :

1. Structure et intervenants :

a. L'ENV :

L'Ecole Nationale de Voile est un établissement public du Ministère de la jeunesse, des Sports et de la Vie Associative situé à Saint Pierre Quiberon dans le Morbihan. Son statut



est le même que l'INSEP de Vincennes, L'Ecole Nationale de Ski de Chamonix ou encore que L'Ecole Nationale d'Equitation de Saumur. Il est destiné à la formation, au perfectionnement des cadres sportifs et à l'entraînement de haut niveau.

Pour le développement sportif, l'ENV met à disposition des prestations adaptées à ses usagers. Les équipes de France, les ligues régionales, les comités départementaux, les classes, les clubs peuvent, en fonction de leurs projets, recourir aux moyens logistiques, aux prestations techniques, à l'expertise des cadres : coaching, préparation à l'entraînement, expertise technologique. Dans le cadre des filières « haut-niveau », l'Ecole anime, en lien avec la Fédération Française de Voile, un pôle espoir F18. Ce pôle contribue à former les meilleurs jeunes régatiers français, notamment en vue des prochaines échéances olympiques. En amont, l'Ecole gère, en lien avec la Ligue de Bretagne, un centre labellisé d'entraînement (CLE) en Hobie –Cat 16 et en First-Class 8. L'ENV possède également un SRD (service de recherche et de développement), il permet de produire des outils pour l'aide au développement sportif: création d'une ceinture de trapèze, mesures, aide aux projets des sportifs de haut-niveau, préparation mentale, préparation physique.

b. Les intervenants :

- Responsable du stage : **LECOMTE Franck** :

Professeur de sport à l'ENV ; intervenant sur les thématiques liées à l'entraînement et au coaching ; en charge du secteur préparation physique (pôle France et pôle espoir).

- Entraîneur des Tornado : **NEIRAS Philippe** :

Entraîneur de l'équipe de France de Tornado.

- Entraîneur des HC16 : **CLOUET Yves** :

Professeur de sport à l'ENV entraîneur du pôle espoir (HC16 et F18).

2. Population expérimentale :

a. **Données anthropométriques :** (voir détail en annexe 1; *pl*).

Série	N	Age	Taille	Poids	Préparation physique	Niveau
Tornado	6	28 ans	1 m 79	74 kg	Modérée à forte	Quotas senior et élite
	H	(± 4,2)	(± 7,9)	(± 5,7)		
F18	4	21,5ans	1 m 78	72,7 kg	Faible à modérée	Quotas jeunes.
	H	(±1,5)	(± 2,2)	(± 6,9)		
HC16	6	18 ans	1m78	70 kg	Faible à modérée	National et quotas espoir.
	H	(± 0,5)	(± 4,1)	(± 3,5)		

Tableau n°3 : Données anthropométriques.

Ces données ont été recueillies en début de saison aux mois de septembre et octobre 2005.

On peut d'ores et déjà voir, selon le tableau 3, l'existence de différences notables entre les trois séries dans l'ensemble des variables décrites (en dehors de la taille). Ce point sera plus amplement étudié en discussion.

b. **Données Physiques :** (détails en annexes 1 ; *pl*)

Série	N	FC max	FC repos	FC seuil	V02max	PMA	Rameur 2000m
	B	Bpm	Bpm	Bpm	Min/min/kg	W	(min, W)
Tornado	6	190	61,2	165	57,7 (± 2,5)	276,6	7,185 (± 0,09)
	H	(± 7,7)	(± 7,8)	(± 1)		(± 18)	269 W (± 16,6)
F18	4	199	65,75	170	58,62 (± 5,4)	267,5	7,28 (± 0,1)
	H	(± 4,2)	(±3,34)	(±4)		(± 20,4)	250 W (± 18,2)
HC16	6	199	68 (±	174 (±	59,4± (4,5)	258,3	7,45 (± 0,05)
	H	(± 8,9)	3,9)	8,4)		(± 18,6)	221 W (± 8,07)

Tableau n°4 : Données Physiques.

Les valeurs de VO_2 max, la FCseuil et la PMA ont été saisies lors du suivi longitudinal des sportifs de haut niveau, au Centre Médico-Sportif de Bretagne Sud à Lorient, aux cours des mois de Juin et juillet 2005. C'est un test triangulaire progressif et maximal sur rameur pour tous les sujets. Le choix du rameur provient des similitudes qu'il offre avec les gestes les plus utilisées en voile spécialement au niveau des sollicitations des parties musculaire supérieures.

La FCrepos a été mesurée au réveil. Elle est liée aux habitudes de vie et varie en fonction de l'état de forme, de la capacité de récupération après un effort, de la qualité du sommeil, du niveau de stress et des habitudes alimentaires [17]. C'est pour cette raison que l'opération a été renouvelée 5 jours de suite pour chaque individu. Une moyenne des FC relevées permet alors d'obtenir une bonne FC de repos.

La FCmax est issue du test de 2000m au rameur. Il a été accompli peu après le début de saison sportive, aux mois de novembre et décembre 2005. La méthodologie a été identique pour le CLE HC16, pour le pôle F18 et pour l'équipe de France de Tornado. C'est à dire un échauffement de 10 minutes suivi du temps d'exercice puis d'une récupération de 5 minutes. Les FCmax acquises lors de ce test sont plus élevées que lors du test de VO_2 max et traduisent un effort assurément intensif sur ± 7 minutes. Les temps réalisés au rameur sont un bon indicateur de la condition physique des sujets parce que ce test fait appel à une sollicitation élevée des capacités de PMA.

3. Matériel :

a. Appareillage de mesure de FC :

L'acquisition des données se fait grâce à huit cardio-fréquences mètres « *Polar S610i* », affectés d'une ceinture élastique (émetteur) au niveau du thorax et d'une montre (récepteur) sur le poignet. J'ai employé un gel conducteur Home Care Tech, pour faciliter les contacts électriques de l'émetteur avec la peau. Il n'y a pas d'interférence entre deux sujets proches si la détection des émetteurs par les récepteurs se fait au préalable à plus de 10m.

Ce modèle permet d'enregistrer jusqu'à 99 h de mesures mais surtout, comme pour toute cette étude, d'avoir un échantillonnage précis de 5 secondes pour 22 h d'enregistrement. La capacité de mémorisation permet l'acquisition de plusieurs fichiers successifs.

<i>Enregistrement par échantillonnage</i>	<i>Durée d'enregistrement</i>
5 secondes	22 heures
15 secondes	66 heures
60 secondes	99 heures (pour 1 fichier)

La transmission des données se fait par ondes infrarouges, la montre renvoie l'information à l'ordinateur. Ensuite, grâce à une interface, on acquiert les courbes de FC et autres fonctionnalités (moyenne de FC entre deux évènements, diagramme de dispersion, superposition de courbes etc...).

Tous les sujets ont été informés de la nature de l'étude et de ses désagréments possibles. Il ont donné leur accord et sont volontaires pour collaborer.

b. Mesure des conditions climatiques :

Pour la force du vent, j'ai employé un anémomètre Plastimo de précision 1 dixième. Les températures de l'eau et de l'air proviennent des bulletins locaux de Météo-France. Cet élément est resté suffisamment constant pendant les deux mois de mesure : $T^{\circ} \text{ air} = 9^{\circ} (\pm 3,2)$; $T^{\circ} \text{ eau} = 6^{\circ} (\pm 1,2)$.

Pour l'état de la mer, il n'y a pas de moyen précis de le mesurer, j'ai donc exploité une échelle conçue par l'entraîneur de l'équipe de France (voir annexe 2). De manière générale, le clapot (vagues courtes) est en corrélation croissante avec la force du vent. Cette variable sera de ce fait, comme indiqué en introduction, associée à la force du vent. Comme matériel divers il est profitable de posséder un Aqua-book pour écrire malgré la pluie ou les embruns . Il faut avoir la possibilité d'embarquer sur un bateau suiveur pour noter en temps réel l'activité des sujets⁴, et retranscrire les faits sur les courbes de FC.

4. Procédures :

a. Zone et période d'acquisition:

Les mesures se sont étalées sur trois mois lors de semaines ou week-end d'entraînement en baie de Quiberon. Les données de deux régates nationales ne figurent pas dans l'étude dans un but d'homogénéité. Ceci pour des raisons de la perturbations⁵ du rythme cardiaque inhérentes à la compétition.

⁴ Synchronisation d'un chronomètre avec le départ des cardio-fréquences mètres.

⁵ Stress, durée d'enregistrement, engagement des sujets, position lors de la manche...etc

b. Modalités de fonctionnement:

Il y a deux grands axes de travail en voile : les « speed test » et les parcours de « type banane ». La durée d'une séance d'entraînement est en moyenne de 2 à 4 heures. Elle débute toujours par un échauffement (15 à 20 min) constitué de quelques manœuvres et de gammes de gestes techniques.

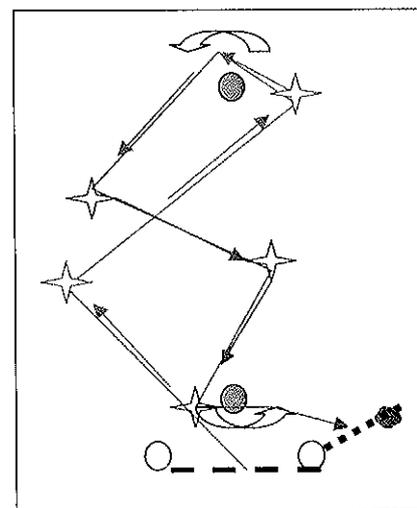
Ensuite, le mode de fonctionnement est le « speed test » : départ en ligne à égalité avec pour objectif principal la vitesse sur une longue distance. Cette phase permet de vérifier et de travailler la vitesse (test de voile, de techniques, amélioration de la concentration et de la conduite, gestion du contact avec l'adversaire etc..). La durée des « speed test » dépend de la période ou des exigences de la saison (plus étendue en début de saison ou lors de test de matériel). Les mesures à partir de cette partie de l'entraînement vont nous permettre de particulariser les sollicitations lors des différentes allures (près/portant) et d'isoler certaines manœuvres pour les expliquer (voir annexe 5 a ; p7).

La deuxième partie de séance est formée de départs et de « parcours banane ». Aussi nommés parcours olympiques, ils comprennent deux tours avec deux remontées et deux descentes par rapport au vent :

Ici pour un tour :

- | | |
|---|---|
|  | Remontée au vent ou « près ». |
|  | Manœuvre de virement. |
|  | Descente sous le vent. |
|  | Manœuvre d'empannage. |
|  | Sens de rotation |
|  | Ligne de départ. |
|  | Ligne d'arrivée. |
|  | Bouées « au vent » et « sous le vent ». |

Direction du vent ↓



Les mesures effectuées pour un parcours ont une durée moyenne de 20 minutes ($\pm 5,2$ min). On parvient ainsi à ± 2 h de mesures sur 4 à 6 manches d'entraînements (voir annexe 5 b ; p7). La durée des manches d'entraînement est inférieure de moitié à la situation réelle de compétition. Malgré cela, elles permettent l'appréciation d'un effort culminant sur deux heures, le temps de repos entre les manches demeurant assez bref⁶.

⁶6,2 min \pm 2,3 pour l'étude contre 20 min en moyenne en compétition.

L'enregistrement des cardio-fréquences mètres est déclenché, pour tous les sujets, lors de la procédure de départ (3min) de la première manche. Une synchronisation avec le chronomètre permet ensuite de noter le début et la fin des manches ainsi que les manœuvres principales (voir annexe 5 a et b ; p7). Une fois la correspondance des notes reportée sur les courbes de FC, le logiciel indique la moyenne, les maximums et la durée des manches. Certaines fonctionnalités du logiciel déterminent la dispersion, le pourcentage de temps passé dans une zone de FC, la dépense calorique théorique, l'échantillonnage ...etc.

c. Gammes de vent (Correspondance : 1 nœuds = 1,8 Km.h-1):

Le choix des gammes de vent est déterminé selon des intensités « charnière » où les modes de fonctionnement de l'équipage se distinguent techniquement, ceci induisant des exigences physiques supplémentaires [13].

Entre 7 et 10 nœuds (13 à 18 Km.h-1) , la force du vent ne requiert pas que l'équipage adopte une position de trapèze. Les deux sujets sont de ce fait en position assise. Le réglage de la grande voile est, uniquement dans cette configuration, réservée au barreur. La force de traction des voiles demeurant faible dans ce type de condition, les sollicitations sont maigres en dehors éventuellement de la manipulation du spi.

De 11 à 14 nœuds (20 à 25 Km.h-1) , l'équipage adopte progressivement la position de trapèze de manière alternative pour garantir l'assiette latérale du bateau (régulation du couple de redressement). Dans cette gamme de vent, les actions de sortie ou de rentrée du trapèze induisent une sollicitation quasi similaire au réglage des voiles. Le rôle de régulation de l'assiette étant assuré en priorité par l'équipier.

De 15 à 18 nœuds (27 à 32 Km.h-1) , la double position de trapèze est permanente. Les conditions de mer se dégradent et deviennent inconfortables pour l'équilibre des sujets. La force à développer pour le réglage des voiles sollicite fortement l'équipier selon le support.

De 19 à 22 nœuds (34 à 40 Km.h-1), les exigences au niveau des appuis sont croissantes, avec les instabilités longitudinale et latérale du bateau résultant du vent et de l'état de la mer. Les réglages secondaires de Cunningham et de chariot d'écoutes nécessitent d'être assurés par le barreur. Les sollicitations des réglages principaux des voiles sont maximum pour les équipiers.

Pour des vents supérieurs à 23 nœuds (41 Km.h-1), l'instabilité de l'assiette, des appuis et de l'équilibre sont à leurs paroxysme, ce qui induit une rapidité de réaction élevée et une lutte constante dans le contrôle l'engin.

RESULTATS :

1. Comparaison des variables support et poste selon le vent :

Vent en nœuds		Tornado		Hobie Cat 16	
		Barreurs	Equippers	Barreurs	Equippers
4	7 à 10	INF 37%	47,58 ± 3,6	INF 37%	INF 37%
5	11 à 14	37,35 ± 4,1	60,35 ± 3	40,08 ± 3,6	43,24 ± 0,9
6	15 à 18	46,51 ± 4,2	75,45 ± 5,4	45,88 ± 3,2	56,13 ± 5,6
7	19 à 23	47,11 ± 3,9	76,39 ± 3,1	54,69 ± 8,1	65,79 ± 2,4
8	Sup à 23	63,52 ± 3,6	73,80 ± 1,4	61,00 ± 4	67,64 ± 2,5

Tableau n°5 : Moyennes des FCR en %:

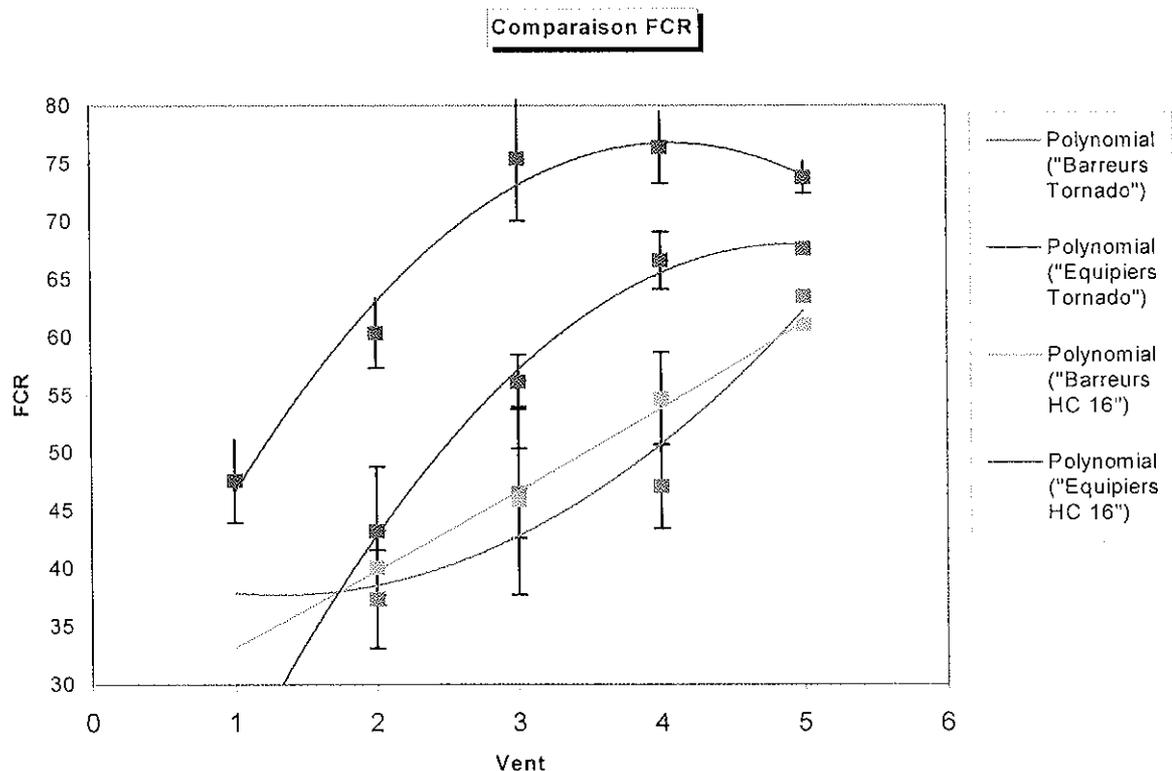


Fig.1 : Courbes polynomiales du pourcentage de FCR en fonction du vent.

Ce tableau n°4 montre l'ensemble des moyennes des FCR mesurées pour tous les sujets dans les diverses manches et conditions de vent. Les résultats bruts qui ont permis de faire ce tableau sont en annexe 4 ; p 3,4,5,6.

a. Résultats numériques :

Premièrement, comme évoqué en introduction, les valeurs inférieures à 37% de FCR n'ont pas été prises en compte. On peut déjà distinguer que seuls les équipiers en Tornado ont des FCR > 37% (47,5%) dans 7 à 10 nœuds de vent. Deuxièmement, en s'intéressant aux gammes de vent où sont atteintes les valeurs maximum de FCR, on obtient le tableau suivant:

<i>Série</i>	<i>Tornado</i>		<i>HC16</i>	
Poste	Barreurs	Equipiers	Barreurs	Equipiers
Vent en nœuds	> 23	15-23	> 23	> 23

Tableau n°6 : Force du vent pour les valeurs max de FCR.

D'une part, sur la fig.1, on remarque la relation étroite entre la force du vent et l'élévation de la FCR, puisque les valeurs maximum de FCR sont atteintes dans les vents les plus forts.

D'autre part, on note que les équipiers Tornadistes gagnent leurs plus hautes valeurs de FCR (>75%) dès 15 nœuds de vent. Ce qui donne naissance à une forme arrondie de la courbe de corrélation FCR/vent (fig.1, courbe rouge).

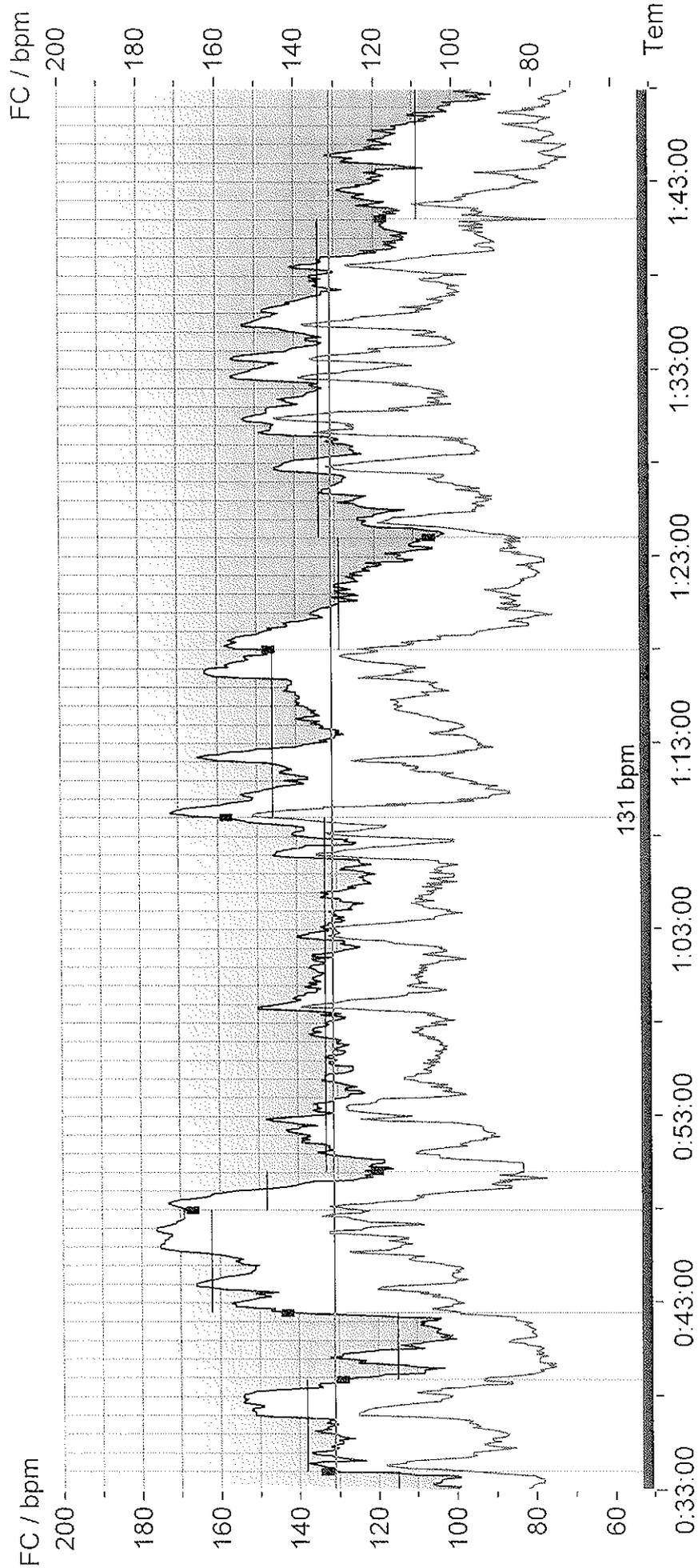
b. Courbes de comparaison :

Les courbes symbolisent les FCR en fonction du vent. Elles coïncident avec leurs plages de données respectives dans le tableau n°5. Les points de valeurs et leurs écart types apparaissent et dénotent un faible écart entre les valeurs et les courbes.

Une première observation visuelle des courbes nous amène à constater que les FCR des équipiers sont plus hautes que celles des barreurs quel que soit le support. Ensuite, si les différences entre les deux supports sont évidentes au niveau des équipiers, en revanche au niveau des barreurs les courbes apparaissent assez proches. Enfin, ces courbes sont des polynômes de degrés 2., leurs formes révèlent une courbure plus prononcée chez les équipiers en Tornado démontrant une augmentation des sollicitations dès les vent faibles à médiums (11 à 18 nœuds).

2. Comparaison des variables allure et manœuvre.

C'est d'avantage sur la partie « speed test » des entraînements que ces variables peuvent être appréciées. La durée des bords est conséquente et les phénomènes ponctuels de manœuvres sont notables. Nous allons directement analyser une courbe de FC brut (fig.2), où les bords de près et de portant sont indiqués en plus des manœuvres.



Valeurs de curseur:
 Temps : 1:48:05
 FC : 96 bpm
 Dépense Cal.: 0 kcal/60min

Non	Exercice	Date	Curseur FC	FC	Durée	Note
1.	15 18 nds	08/12/2005	74	101 / 151	2:54:35.6	Xavier Revil
2.	15 18 nds	08/12/2005	96	131 / 176	2:49:46.3	Christophe Espagnon

Fig.2 : Exemple de courbe de FC brut d'un barreur (rouge) et d'un équipier (bleu) en Tornado dans 15 à 18 nœuds de vent:

Le premier constat, lorsque l'on examine ces deux courbes, est que la FC de l'équipier (courbe bleue) est continuellement supérieure à celle du barreur (courbe rouge). Ensuite, on remarque qu'il y a une véritable synchronisation des variations des deux courbes de FC au cours de la navigation. En effet, le Tornado se pratiquant en double, toutes les actions se font de manière synchrone pour les deux pratiquants. Cependant, dans la continuité des résultats précédents, les sollicitations cardiaques du barreur apparaissent explicitement inférieures.

a. Allures :

<i>Poste</i>	<i>Allures</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Moy FC</i>	<i>% FCR</i>
Barreur	Près	100	111	111	107,3	44
	Portant	112	108		110	46
Equipier	Près	138	133	134	135	61
	Portant	163	148		155,5	77

Tableau n°7 : Comparaison des allures en Tornado dans 18 à 20 nœuds de vent.

Au vu de ce tableau, la différence entre le près et le portant concernerait uniquement l'équipier. Nous verrons ensuite si ce constat est confirmé par les statistiques. D'autre part, seule une étude intégrale, selon tous les types de vents et selon les postes, permettrait de tirer de réelles conclusions quant aux différences entre les deux allures.

b. Manœuvres :

A chaque pic de FC correspond une manœuvre. Elles ne figurent pas toutes sur les courbes pour une question de lisibilité, pourtant elles ressortent visuellement de la courbe du barreur. En effet, nous le distinguerons dans la discussion, mais le barreur ne s'occupe du réglage des voiles que dans les manœuvres au près (virements). Par conséquent, l'aspect de la courbe de FC dénote plus d'irrégularités que celle de l'équipier (voir près 1 et près 2 sur fig2). Dans le même registre, on observe un pic de FC à la fin de chaque près et à chaque début et fin de portant. Ce qui correspond respectivement à un virement, un envoi de spi et un affalage de spi. Les courbes dans ce type de vent, où les deux pratiquants sont au trapèze, sont assez caractéristiques de la fig2. Comme pour les allures, il serait intéressant de faire de plus larges mesures de manœuvres, ce qui est rendu difficile par la rapidité et la ponctualité de cet événement. De surcroît, l'indicateur cardiaque reflète très partiellement l'intensité d'efforts brefs et violents qui implique d'autres voies métaboliques que l'aérobie [16].

3. Analyses et statistiques :

a. Test de Kolmogorov-Smirnov :

L'objectif est de comparer les plages de données (ensemble des moyennes de FCR selon le vent) par rapport à la loi de probabilité normale (courbe de Gauss). Ceci afin de déterminer leurs caractères paramétriques ou non paramétriques.

<i>série</i>	<i>Spécialité</i>	<i>Données</i>
Tornado	Barreurs	paramétriques
	Equipiers	paramétriques
HC16	Barreurs	paramétriques
	Equipiers	paramétriques

Tableau n°8 : Test pour les %FCR moyennes.

Pour chaque cas la probabilité est supérieure à 0.05, on garde donc l'hypothèse nulle. Il n'y a pas de différence significative avec la courbe de Gauss, par conséquent toutes les plages données selon le vent sont paramétriques. Nous utiliserons donc le Test de Pearson pour les corrélations et le Test de Student pour les comparaisons.

b. Test de corrélation paramétrique de Pearson : Vent / FC :

Support	Tornado		Hobie Cat 16	
	Barreurs	Equipiers	Barreurs	Equipiers
Poste				
Nb de donnée	35	46	26	23
p bilatérale	0,062	0,058	0,003	0,05
R ² linéaire	0,879	0,748	0,994	0,902
R ² polynomial	0,916	0,978	0,994	0,999
≠ des R ²	0,037	0,23	0	0,097

Tableau n°9 : Corrélation % FCR / Vent.

Plus R est proche de 1 plus la corrélation est significative. On calcule R² qui permet une approche plus précise de la déviation de la corrélation. Si on prend en compte le nombre de données (2^{ème} ligne du tableau n°9) et « p bilatérale » (3^{ème} ligne), le premier constat est que la corrélation entre la FCR et la force du vent est très significative (voir Table 9.1 en annexe 3).

Néanmoins, le coefficient de corrélation de Pearson suppose que la relation soit linéaire. Et comme les courbes de résultats et ce tableau n°9 nous le dévoilent, la corrélation FCR / Vent concorde mieux avec une régression d'ordre polynomiale du second degré. En effet, on distingue que plus la courbure du polynôme est prononcée (ex : équipiers de Tornado), plus la FC augmente vite dès les gammes de vents faibles. On perçoit aussi que le maximum de la courbe précède les valeurs vent maximum.

Le deuxième constat est ensuite que, en Tornado et pour les équipiers, on atteint plus vite dans des gammes de vents plus faibles des FCR élevées.

Corrélation ne sous-entend pas obligatoirement relation causale. Ainsi nous devons expliquer en discussion, la relation de cause à effet entre l'augmentation du vent et l'augmentation de FCR.

Après avoir montré la corrélation FCR / Vent, nous allons comparer les données entre Tornado et HC16.

c. Tests paramétriques de Student indépendants :

Cette étude est transversale : ce sont donc des échantillons indépendants qui sont comparés. Test unilatéral Moyenne 1 < Moyenne 2.

▪ Comparaison %FCR / SUPPORT :

Support	HC16 (M1) / Tornado (M2)	
Poste	Barreurs	Equipiers
P unilatérale	0,59	0,048*
H 0	Validée	Rejetée
Différence : ($p < 0,05$)	non	oui
Hypothèse : $M1 < M2$	Rejetée	Valide

$p \leq 0,05^*$

Tableau n°10 : HC16 versus Tornado

D'après les résultats du test de Student, le premier constat significatif ($p < 0,05$) est : FCR équipiers HC16 < FCR équipiers Tornado. A contrario, le deuxième constat est que : l'hypothèse FCR barreurs HC16 < FCR barreurs Tornado ne se vérifie pas ($p > 0,05$ on ne peut pas rejeter H0). Par conséquent il existe uniquement une différence pour les équipiers entre le support jeune HC16 et le support olympique Tornado.

▪ **Comparaison %FCR / POSTE :**

Poste	Barreur (M1) / Equipiers (M2)	
Support	Tornado	HC16
P unilatérale	0,007 **	0,044 *
H 0	Rejetée	Rejetée
Différence : ($p < 0,05$)	oui	oui
Hypothèse : M1 < M2	Valide	Valide

$p \leq 0,05^*$

$p \leq 0,01^{**}$

Tableau n°11 : Barreur versus Equipiers.

La différence entre les rôles de barreurs et d'équipiers est significative pour les deux support, spécialement en Tornado ($p \leq 0,01$).

▪ **Comparaison %FCR / ALLURES⁷ (en Tornado dans 18-20 nœuds).**

Allure	Près (M1) / Portant (M2)	
Poste	Barreurs	Equipiers
P unilatérale	0,261	0,048*
H 0	Validée	Rejetée
Différence : ($p < 0,05$)	Non	oui
Hypothèse : M1 < M2	Rejetée	Valide

$p \leq 0,05^*$

Tableau n°12 : Près versus portant.

La différence de FCR est uniquement significative pour l'équipier entre le près et le portant. Ces données sont à prendre avec prudence puisqu'elles ne concernent qu'une seule courbe de FC. Cependant elles peuvent être une prémisse à de plus amples observations.

▪ **Tableau n° 13 récapitulatif :**

Série	Barreurs To (M1) / Equipiers To(M2)	Barreurs HC16 (M1) / Equipiers HC16 (M2)	Equipiers HC16 (M1) / Equipiers To (M2)	Près (M1) / Portant(M2)
Différence M1 < M2	++	+	+	0 à +

⁷ Test de Student pour échantillons appariés.

▪ **Comparaison %FCR Catamaran / Laser :**

Support	Tornado (M1) / Laser(M2)		HC16 (M1) / Laser (M2)	
	Barreurs	Equippers	Barreurs	Equippers
P unilatérale	0,006**	0,997 ⁸	0,013*	0,082
H 0	Rejetée +	Validée ++	Rejetée	Validée
Différence (p<0,05)	oui	Non = égalité	oui	Non
Hypothèse : M1 < M2	Valide +	Rejetée ++	Valide	Rejetée

$p \leq 0,05^*$

$p \leq 0,01^{**}$

Tableau n°14 : Catamaran versus Laser.

Les données du Laser proviennent de l'étude de O.Castagna *et al* (2004). L'objectif de ce travail [10] a été de vérifier la validité de FCR par rapport à la consommation d'O₂ lors de la navigation en Laser. Des mesures de FCR dans plusieurs conditions de vent ont de la sorte été effectuées, ce qui permet une comparaison avec mon étude.

Au vu du tableau n°14 le constat le plus important est : la similitude des FCR entre les équipiers en Tornado et les Laséristes pour les mêmes conditions de vent. En effet , l'hypothèse nulle H₀ est vrai à 99,7 % pour une comparaison de plages de données de gammes du vent équivalentes. En revanche, FCR barreurs HC16 et Tornado sont très significativement inférieures à FCR Laséristes ($p \leq 0,01$).

Ces observations dévoilent encore une fois la différence entre les barreurs et les équipiers. Particulièrement en soulignant l'importante sollicitation cardiaque des équipiers en Tornado. Celle-ci étant identique au Laser où la préparation physique est déterminante.

⁸ Test bilatérale entre équipiers Tornado et Laser pour les mêmes gammes de vent.

DISCUSSION

1. Retour sur la problématique :

Le premier objectif du traitement des données recueillies est d'apporter une connaissance des sollicitations en catamaran, autorisant des comparaisons internes à la filière comme externes vers d'autres séries olympiques. L'analyse des résultats met en avant quatre axes d'exploitation de données⁹, qui permettent de décrire et de quantifier les spécificités de l'exercice physique des athlètes en catamaran.

Le trois premiers axes sont inhérents à la filière¹⁰ catamaran et découlent respectivement de l'influence des évolutions techniques et mécaniques du support, des répercussions de la différenciation des rôles barreaux / équipiers et enfin de l'alternance des allures près / portant en parcours olympique.

Après cette analyse la plus exhaustive possible des contraintes cardiaques en catamaran, il restera à développer le quatrième axe de recherche qui s'oriente vers une réflexion plus générale de l'activité voile. Ceci en déterminant, de manière hiérarchique, la place des sollicitations physiologiques de cette série au sein des différents supports olympiques.

2. Interprétation des résultats :

a. Relation causale de la corrélation FCR / vent :

La plupart des études qui traitent de la corrélation positive entre la FC et la force du vent [1,9,10] ont mis en évidence un lien de causalité. En excluant la planche à voile où l'autorisation du « pumping¹¹ » (novembre 1992) induit des sollicitations supérieures dans les vents faibles.

Ce sont principalement l'augmentation de la force à développer et les changements de mode de fonctionnement de l'équipage qui sont à l'origine de ce lien. Le meilleur moyen de l'expliquer est de se reporter aux facteurs qui ont permis de déterminer les gammes de

⁹ Se reporter aux différents tests statistiques de comparaison de %FCR dans la partie 3c des résultats.

¹⁰ Se reporter au tableau n°13 dans les résultats, récapitulatif de l'analyse des trois variables prépondérantes de l'activité.

¹¹ Tractions répétées sur le gréement afin d'augmenter la vitesse de l'engin.

vent¹². En effet, ces facteurs reflètent l'évolution des exigences physiques en concomitance avec l'augmentation de la force du vent.

L'évaluation de cette corrélation débouche sur la problématique de la variabilité du milieu en voile qui induit des mesures et une analyse dans toutes les conditions météorologiques. Dans l'exécution d'un geste ou d'une action, les sollicitations physiologiques ne seront pas identiques selon les conditions, ce qui implique par exemple qu'un entraînement physique peut être pertinent uniquement pour certaines gammes de vent.

D'autre part, le caractère linéaire de la corrélation n'est pas obligatoirement le plus approprié. Nous avons vu que la régression polynomiale était plus significative selon le support et le poste.

b. Conséquences des influences techniques et mécaniques des supports sur la cinétique cardiaque¹³ :

Ce sont surtout la puissance et l'exigence du support qui vont déterminer le niveau de sollicitation de l'équipage. Le tableau n°2 (p7) décrit les évolutions techniques du Tornado. Les exigences se situent au niveau des matériaux (tissu de voile, mât carbone), de la surface et forme de voile, de la rigidité générale du bateau et dans son rapport longueur / largeur. Ces aspects vont agir selon trois axes : accroissement de la force musculaire à développer pour assurer le réglage des voiles, instabilité des appuis en raison de la réactivité de l'engin, et enfin dans la gestion de techniques supplémentaire.

Le premier axe affecterait prioritairement l'équipier dans le cadre de son rôle de régleur. Une étude EMG serait nécessaire pour l'affirmer, mais selon une évaluation technique logique, l'effort de réglage en Tornado induit une sollicitation supérieure en comparaison au HC16.

Ce paramètre est incontestablement le plus pertinent dans l'explication de la différence significative ($p \leq 0,05$) entre les équipiers en Tornado et en HC16.

Le Tornado se distingue également au travers du rapport poids/puissance, son inertie est faible traduisant une nervosité et une réactivité accrue. A l'inverse, la constance de la vitesse du HC16 est moins exigeante et permet davantage une décentralisation de la concentration. Ce qui nous ramène au deuxième axe concernant l'instabilité des appuis et de l'équilibre coûteux en vigilance et en attention.

¹² Se reporter au chapitre matériel et méthode (4, c).

¹³ Se référer au Tableau n°10 : « HC16 versus Tornado »

Les aspects techniques supplémentaires du Tornado découlent de la variété des réglages à gérer simultanément. Les paramètres à prendre en compte et à coordonner sont plus nombreux et plus délicats qu'en HC16. L'équipier a, en plus de la grand' voile ou du spi, les réglages de rotation de mât et de bordure de grand' voile à assurer. En bref, la coordination et le nombre de paramètres à gérer sont autant d'aspects responsables de la haute sollicitation des équipiers en Tornado.

c. Répercussion de la différenciation des rôles sur les exigences physiques des sujets¹⁴.

Sur des supports en binôme comme le catamaran, les rôles sont définis dans un but purement fonctionnel visant la performance optimale de l'équipage. Les incidences de cette nécessité vont se traduire directement sur les sollicitations et profil physiques des pratiquants.

Les résultats font apparaître une différence significative de FCR entre barreaux et équipiers de chaque support. Logiquement l'écart est plus élevé en Tornado ($p \leq 0,01$), traduisant le parallèle entre la différence des équipiers à la quasi égalité des barreaux dans la comparaison des deux supports.

En quantifiant ce résultat en pourcentage, on obtient le tableau suivant :

<i>Vent en noeuds</i>	<i>Tornado</i>	<i>HC16</i>
11 à 14	61,58 %	7,88 %
15 à 18	62,22 %	22,34 %
19 à 22	62,15 %	20,30 %
> à 23	16,18 %	10,89 %

Tableau n°15 : Pourcentage de l'écart de FCR entre barreaux et équipiers.

Ces résultats nous apportent une appréciation plus fine de l'écart résultant de la différence d'exigence liée au rôle du pratiquant. L'exercice à fournir, entre 11 et 22 noeuds, par l'équipier Tornadiste est plus d'une fois et demie supérieure à celle du barreur. Cette particularité est notamment à l'origine de la forme parabolique de la courbe de FCR.

¹⁴ Se référer au Tableau n°11 : « Barreaux versus équipiers ».

Ce phénomène est une conséquence de l'obligation de réglage et de manipulation des voiles de l'équipier. Ce rôle lui est attribué du fait de sa position à bord et de sa liberté de mouvement, car il ne s'occupe pas de la conduite de l'engin. Plus précisément, le réglage de la grand' voile et du foc au près, l'envoi et l'affalée à chaque début et fin de portant et le réglage du spi, sont à la charge de l'équipier. A ça s'ajoute un rôle prioritaire sur la régulation de l'assiette du bateau et quelques réglages secondaires de bordure et chariots d'écoutes.

Tout est mis en œuvre dans un but visant la performance, le barreur doit être déchargé au maximum des contraintes physiques qui desservent sa concentration et la recherche constante d'une vitesse optimale.

Le pourcentage plus élevé de l'écart en Tornado résulte des phénomènes associés des variables poste et support.

d. Prémisses d'une étude sur l'alternance des allures près / portant¹⁵ :

Le près est par définition l'allure de remontée au vent où le réglage de la grand' voile et du foc ainsi que le double trapèze sont nécessaires. Au portant (allure de descente par rapport au vent), seul l'équipier est au trapèze et s'occupe du réglage du spi en l'ayant préalablement installé du tango à la tête de mât (manœuvre d'envoi du spi).

Malgré le caractère incomplet de l'étude des FCR selon l'allure, la différence significative entre près et portant pour l'équipier en Tornado s'explique pour diverses raisons.

La première est la manipulation d'envoi et d'affalée du spi nécessaire à chaque début et fin de portant (le spi n'étant pas approprié à la navigation au près). C'est un exercice sollicitant du fait de sa rapidité et de la force à développer lors de son exécution. Les conséquences en sont visibles sur les courbes brutes de FC au travers de pics d'une trentaine de secondes.

La deuxième explication réside dans la difficulté d'adopter la position de trapèze en luttant contre la traction de l'écoute de spi.

Cependant, l'interprétation la plus probable résulte dans l'élévation de la fréquence des réglages sous spi, sollicitant de manière plus constante l'activité musculaire du sujet.

¹⁵ Se référer au tableau n°12 : « près versus portant ».

De la même manière que précédemment, l'hypothèse d'un phénomène associé entre l'allure et le support ou encore entre l'allure et la force du vent n'est pas à exclure. Ce qui nous renvoie à la pertinence d'une étude plus complète de cette variable.

e. Réflexion sur la place des sollicitations cardiaques en catamaran dans la hiérarchie des séries olympiques¹⁶.

Les études sont nombreuses concernant les séries Laser et planches à voile, sans doute grâce à la prépondérance de l'aspect physique dans la performance des athlètes. Présentement, j'ai comparé mes mesures aux données recueillies en Laser par O.Castagna *et al* en 2004 [10]. Ce sont les similitudes de la variable mesurée (FCR) et la prise en compte de gammes de vent qui ont orienté mon choix.

Comme le fait apparaître l'évolution et l'analyse des résultats tout au long de mon travail, l'équipier Tornadiste est soumis, sans aucun doute possible, aux exigences les plus élevées dans la filière catamaran. En comparaison, après un test bilatéral, on obtient une quasi égalité avec la cinétique des FCR en Laser.

D'autre part, il n'y a pas de différence significative entre les Laséristes et les équipiers en HC16. On peut donc considérer, sans évoquer de nettes similitudes, que les efforts fournis par ces deux populations, ne sont pas très éloignés.

Les travaux les plus récents en Laser [1,3,9,10], concluent à une sollicitation modérée à forte de la filière aérobie, comparable à d'autres sports pour les élites [3]. Les exigences de la pratique en catamaran, pour les équipiers tout du moins, tendent à se rapprocher d'une telle série, où à l'heure actuelle, la préparation physique est un facteur prédominant dans la performance [1,2,9].

¹⁶ Se référer au Tableau n°13 : « catamaran versus laser ».

3. L'aspect physiologique au sein des déterminants de la performance olympique en Tornado :

a. Pondération de l'entraînement physique en voile :

La performance en voile s'exprime dans l'interaction d'un large panel de facteurs plus ou moins dominants. Ils se répartissent communément suivant cinq catégories [18] : Tactiques, Technique, Technologique, Psychologique et Energétique. L'importance de chacun de ces déterminants varie selon trois critères [18] : le support, le niveau de pratique, le rôle de l'individu. Notamment l'aspect énergétique qui a fait l'objet de cette étude.

La complexité de la pratique en voile réside dans le nombre élevé de paramètres à gérer simultanément. Par conséquent elle est considérée comme une activité à forte dominante informationnelle (pocciello, 1981 ; Famose, 1990). Le traitement de l'information, l'attention et la concentration sont déterminants [19].

L'entraînement physique vise principalement à améliorer les qualités énergétiques¹⁷ et motrices¹⁸, ceci dans un but de performance et de préservation de l'individu. Dans le cas de la voile, il va également garantir une réduction de la charge physique au bénéfice des charges informationnelles.

La préparation physique, grâce aux améliorations des capacités corporelles, allège le coût énergétique et moteur de l'activité. Ceci au profit des dominantes tactiques, techniques et psychologiques. Plus précisément dans : la rapidité et l'exactitude des prises d'informations extérieures, l'exploitation des rotations de vent, la situation par rapport au parcours et aux adversaires, le choix du réglage optimum, l'appréciation de la vitesse et du rendement de l'engin, la lucidité dans la gestion du contact. Autant de facteurs essentiels à la performance en voile. En un mot, la préparation physique apporte à l'équipage suffisamment de confort pour qu'il puisse « oublier » les contraintes corporelles et se consacrer à la stratégie de course.

b. Cas de la filière catamaran :

Au vu du chapitre précédent, trois variables vont conditionner la répartition du volume d'entraînement dans chacun des facteurs de la performance : le support, le niveau de pratique et le rôle de l'individu. La spécificité de la progression au sein de la filière catamaran réside dans l'accumulation de ces trois variables. Premièrement, pour ce qui est du support, au travers des différences fondamentales de jauges entre le HC16 et le

¹⁷ Capacités aérobie et anaérobie, de puissance et de vitesse.

¹⁸ Force, souplesse, coordination, équilibre.

Tornado, largement étudiées au début de l'étude. Ensuite, pour ce qui est du niveau, avec le passage du niveau espoir national au niveau élite internationale. Et enfin, pour ce qui est du poste de l'individu, dans la différenciation des rôles barreaux/équipiers, flexible à la sortie du HC16. La pratique en Tornado à haut niveau implique par conséquent un bouleversement complet des exigences, qui ne se compense pas par la seule maturation de l'individu. Il apparaît primordial de tenir compte de l'objectif olympique d'une carrière en catamaran, dans la pondération de la préparation physique en HC16. L'étude des sollicitations et des profils types des pratiquants en Tornado est par conséquent la meilleure méthode pour proposer des solutions adéquates dès le HC16.

▪ **Conclusion sur les contraintes cardiaques en Tornado :**

Nous avons tenté dans ce travail de quantifier l'effort grâce au paramètre cardiaque. La comparaison avec des études utilisant le même indicateur, nous a amené à la conclusion que les exigences des équipiers Tornadistes égalent celles d'une série comme le Laser. Et cela dans des conditions de navigations similaires. Néanmoins, les gestes et modalités de fonctionnement¹⁹ différent, ce qui induit des contraintes musculaires réparties inégalement sur les parties supérieures ou inférieures du corps. A l'inverse des études plus complètes faites sur Laser [7], mon analyse des contraintes musculaires est uniquement basée sur les observations technologiques et posturales. Seule une évaluation EMG des régions prioritairement sollicitées nous permettrait d'affirmer l'hypothèse de la participation élevée des membres supérieurs en catamaran.

▪ **Comparaison des données anthropométriques :**

La variété des profils anthropologiques en voile résulte de la diversité des jauges qu'offre le large panel des supports olympiques. Cet éventail évolue selon les olympiades, grâce à au renouvellement technologique perpétuel des séries. Le Tornado, et par conséquent le catamaran, est devenu un support olympique au J.O de Montréal en 1976. Afin d'être reconduit au J.O d'Athènes en 2004, ce bateau a subi des modifications capitales. En effet, après Sydney 2000, le double trapèze et le spi ont été autorisés. A la suite des analyses préalables, l'hypothèse de l'adaptation de la morphologie des coureurs paraît pertinente. La comparaison de mes données avec la littérature [22,23,24,25] est complexe en raison de l'actualisation des jauges et des supports olympiques. Ces travaux apportent néanmoins de précieuses informations sur le profil physique des séries invariantes comme le Laser, le Star ou encore le 470.

¹⁹Position de trapèze et puissance de l'engin.

Après l'évaluation des contraintes cardiaques en Tornado, la définition d'un profil anthropométrique et physiques type, constitue un deuxième outil dans la détermination de l'objectif à atteindre en débouché de la filière jeune HC16.

Supports	Poste	age	pds	taille
Tornado	Barreurs	28,3 (±5,0)	68,3 (±0,9)	173,6 (±2,6)
	Equipiers	27,6 (±3,3)	79,6 (±0,5)	183,6 (±8,2)
F 18	Barreurs	21,5 (±1,5)	74,0 (±6,0)	178,0 (±2,0)
	Equipiers	21,5 (±1,5)	71,5 (±7,5)	178,5 (±2,5)
HC16	Barreurs	18,0 (±0,0)	71,3 (±0,9)	178,3 (±2,9)
	Equipiers	18,0 (±0,8)	68,6 (±4,5)	178,3 (±5,2)

Tableau n°16 : Comparatif des données anthropométriques

L'âge moyen en équipe de France de Tornado est de 30-35 ans²⁰. Dans notre étude, deux équipages sont en équipe de France espoir, réduisant la moyenne d'âge à 28 ans. L'atteinte du niveau élite en Tornado requiert donc entre 12 et 15 ans de pratique après le HC16. Ce qui s'explique par la grande technicité du support.

Le poids idéal se situe aux environs des 150Kg pour l'équipage en Tornado, représentant une addition de 20 Kg à la jauge du HC16 qui est de 130 Kg. Favorablement cette jauge est minimale, ce qui explique la moyenne de 140 Kg des équipages en HC16. Néanmoins, la recherche de performance en HC16 tend à se rapprocher le plus possible du minima de 130 Kg. La problématique réside donc dans le paradoxe entre le stationnement à 130 Kg en HC16 et la nécessité d'atteindre 150 Kg en Tornado.

Supports	Poste	FC max	FC repos	VO2 max	PMA
Tornado	Barreurs	191,6 (±9,3)	64,0 (±9,4)	54,7 (±2,6)	256,6 (±9,4)
	Equipiers	187,6 (±3,1)	57,6 (±2,1)	59,5 (±1,5)	290,0 (±14,1)
F 18	Barreurs	198,0 (±5,0)	66,5 (±3,5)	61,1 (±6,2)	285,0 (±15,0)
	Equipiers	194,5 (±8,5)	66,0 (±2,0)	55,1 (±2,5)	250,0 (±0,0)
HC16	Barreurs	193,0 (±9,2)	65,0 (±2,9)	61,4 (±4,6)	266,6 (±23,6)
	Equipiers	205,0 (±14)	71,0 (±2,2)	57,5 (±3,5)	250,0 (±0,0)

Tableau n°17 : Comparatif des caractéristiques physiques

Le point essentiel extrait de ce tableau n°17 est l'écart de 40 Watts entre la PMA des équipiers du Tornado et du HC16, ceci en débit d'une VO₂ max plutôt semblable.

²⁰ Moyenne basée sur les trois équipages visant la sélection 2008.

Ce constat s'associe aux résultats du tableau n°18 ci-dessous :

<i>Supports</i>	<i>Poste</i>	<i>Temps</i>	<i>Pw moy</i>
Tornado	Barreurs	7,23	244,3 ($\pm 5,2$)
	Equipiers	7,08	283,6 ($\pm 8,3$)
F 18	Barreurs	7,21	265,5 ($\pm 2,5$)
	Equipiers	7,37	235,5 ($\pm 14,5$)
HC16	Barreurs	7,45	222,0 ($\pm 6,0$)
	Equipiers	7,46	220,3 ($\pm 10,4$)

Tableau n°18 : Comparatif du test de 2000m rameur.

Le décalage maximum est ici supérieur à celui du tableau 17, avec une différence de 63,3 Watts sur 2000m au rameur entre l'équipier Tornado et l'équipier HC16. Les équipiers en Tornado déploient une capacité de puissance élevée, ce qui suggère la pertinence d'une éventuelle étude de la filière anaérobie.

L'analyse parallèle des trois tableaux 16,17 et 18 fait ressortir l'aspect primordial de la spécialisation physique de l'équipiers en Tornado. Les variables de poids, de taille, de PMA et de puissance sur 2000m rameur sont sensiblement différentes entre barreurs et équipiers Tornadistes. Ceci en association et en confirmation des résultats de sollicitations cardiaques développées antérieurement.

Toutefois, spécialiser les équipages dès le HC16 ne présente pas la meilleure solution pour la préparation des jeunes pratiquants. En effet, les rôles ne sont pas affectés définitivement après le HC16, un changement de poste étant occasionnellement réalisé dans les premières années de pratique en Tornado. En revanche, ce paramètre sous-entend qu'en dépit d'exigences²¹ inférieures des barreurs en HC16, les capacités physique doivent être développées à l'identique entre barreurs et équipiers, ceci permettant ultérieurement un choix plus souple du poste.

La préparation physique en HC16 était jusqu'à maintenant fonction des activités de loisirs sportifs de chacun. . Grâce aux résultats exploités dans cette étude, nous avons pu déterminer que les Tornadistes, surtout l'équipier, doivent répondre à des exigences physiques accrues (sollicitations cardiaques, capacité de PMA, masse musculaire, etc...) . Compte-tenu du fait que le Tornado est un support très technique qui nécessite un important investissement intellectuel²², il convient de s'affranchir de la contrainte physique en la développant en amont.

²¹ Tout du moins cardiaque en ce qui concerne cette étude.

²² Aspects techniques, tactiques, technologiques, psychologiques.

4. Intérêt de la pratique transitoire en F18

a. Au travers des contraintes physiques et anthropométriques :

La sollicitation cardiaque en F18 n'a pas été traitée dans cette étude en raison de la non-homogénéité des sujets et des mesures réalisées. Les données recueillies, une fois complétées, feront l'objet d'un travail ultérieur. C'est en conséquence une analyse technologique, fonctionnelle et anthropologique que nous allons entreprendre.

▪ Aspect technologique :

Nous avons exposé auparavant l'influence de la puissance et de l'exigence du support sur le niveau de sollicitation d'un l'équipage²³. La pertinence de l'aspect transitionnel de la pratique en F18 se situe principalement dans le caractère intermédiaire de la jauges de ce catamaran (voir tableau n°2 p7). Nonobstant la gestion de techniques supplémentaires²⁴, le F18 demande une charge physique inférieure au Tornado dans la maîtrise et l'efficacité de ses réglages. Ces contraintes sont assurées par l'équipier, ce qui nous renvoie à l'hypothèse d'une sollicitation éminente de celui-ci.

D'autre part, le niveau d'expertise requis en F18 autorise un perfectionnement régulier dans chacun des déterminants de la performance en voile. L'écart raisonnable entre l'objectif convoité et les compétences acquises permet de valoriser rapidement les progrès du pratiquant. En comparaison, l'atteinte du plus haut niveau en F18 aboutit à la pratique du Tornado de la même manière que les meilleurs équipages du HC16 accèdent au F18.

▪ Aspect anthropométriques :

L'intérêt de ce support demeure pleinement sa qualité d'intermédiaire qui se distingue identiquement dans les caractéristiques anthropométriques. Considérons tout de même une mention spéciale pour le poids, qui appelle réglementairement à dépasser les 150 Kg. Un équipage établi entre 140 et 150 Kg doit rajouter, fixement au bateau, la moitié du poids nécessaire pour atteindre 150Kg. La problématique de la prise de poids après le HC16 existe également en F18, néanmoins elle moins discriminante que dans la série Tornado. La masse corporelle est fréquemment un critère sélectif en voile, d'autant plus que son développement est risqué et ardu.

²³ Matériaux, surface et forme de voile, rigidité de l'engin, rapport longueur/largeur.

²⁴ Bordure, chariot d'écoute, Cunningham.

b. Au niveau financier et fédéral :

En raison du coût d'une saison en Tornado, la Fédération Française de Voile encourage désormais les jeunes, après leur parcours en HC16, à s'orienter vers le F18. Dorénavant, la performance en F18 est exigée avant l'accession à l'olympisme. Dans cette optique, la FFV a déterminé l'ouverture des quotas « haut niveau jeune » au F18. Ainsi, le premier pôle espoir F18 est apparu en septembre 2005 à L'ENV (Ecole Nationale de Voile).

D'un point de vue financier, un Tornado coûte 35 000 Euros incluant un mât carbone et des voiles compétitives. Pour le HC16 c'est de l'ordre de 8000 Euros. Le F18 s'ajuste entre les deux avec un prix de 17 000 Euros.

En conclusion, suivant une dimension progressive, le F18 permet de combler le fossé de l'accession à l'olympisme é partir du HC16. Ceci au profit de la préparation, des pré-requis et du budget nécessaire à la performance en Tornado.

5. Critiques à l'égard de perspectives technologiques et qualitatives :

a. Validité de la FC comme indicateur du degré de sollicitation physique:

La FC ne saurait être un reflet parfaitement fidèle de l'intensité de l'exercice. Un accroissement de la FC traduit d'abord une augmentation de l'intensité de l'activation musculaire²⁵ et du recrutement des unités motrices²⁶ [16]. Ensuite, indirectement, l'augmentation du rapport besoins O₂ / apports en O₂ va constituer un stimulus pour la réponse cardiaque. C'est l'association de ces deux variations qui va réguler le débit cardiaque à l'effort [16]. Par conséquent, la quantification plus précise de la participation de la filière aérobie passe par l'utilisation d'un appareil portatif de mesure de la VO₂ (K4).

La mesure de la FC reste néanmoins pertinente dans l'hypothèse d'un effort aérobie stable restant compris entre des valeurs minimales et sub-maximales. Ce qui valide uniquement les données lors de manches d'une durée supérieure à 20 minutes ou lors de « speed tests » (voir annexes 5a et 5b p7). Les phénomènes ponctuels de manœuvre ou de phase de départ, induisent davantage une étude de la filière anaérobie. Ceci à la condition d'une intensité d'exercice supérieure au seuil lactique. La FCseuil est dans ce cas un bon indicateur qualitatif dans la détermination de la filière prioritaire utilisée.

²⁵ Phénomène de « feed-back » (régulation en retour): Réponse d'une augmentation de la FC à une vasodilatation locale lors de l'activation musculaire.

²⁶ Phénomène de « feed-forward » (pré-adaptation) : Anticipation cardiovasculaire de l'organisme à un accroissement des besoins en O₂

b. Evaluation des contraintes musculaires et traumatismes posturaux :

Seule une évaluation EMG nous permettrait d'affirmer l'hypothèse de la participation élevée des membres supérieurs en catamaran. Une étude des régions prioritairement sollicitées, servirait à l'établissement d'une cartographie musculaire et l'évaluation des éventuels traumatismes résultant de la position de trapèze²⁷. Subséquemment, un travail biomécanique sur les contraintes articulaires scapulaires et rachidiennes serait également une avancée dans la préservation des athlètes en catamaran.

Pour recueillir et modéliser ces données, la meilleure méthode serait l'utilisation d'un banc de mesure reproduisant la position de trapèze et les contraintes de réglages d'une voile.

c. Achèvement du profil type :

Il serait nécessaire, pour représenter l'ensemble de la population pratiquante, d'étudier un plus grand nombre de sujets, spécialement en équipe de France de Tornado. Ceci toujours dans l'optique de déterminer un l'objectif à atteindre en débouché de la filière jeune HC16.

²⁷ Hypothèse de contraintes musculaires lombaires et abdominales.

CONCLUSION

L'objet de ce travail était d'abord d'étudier les sollicitations cardiaques en catamaran de sport. Nonobstant la considération d'un seul des indicateurs de l'ensemble des sollicitations physiologiques, les résultats ont permis de quantifier partiellement l'effort en catamaran de sport, particulièrement grâce à la comparaison avec d'autres travaux utilisant la FC pour étudier les exigences de l'activité voile.

L'interprétation des résultats résulte principalement d'une analyse technique et technologique. Les conclusions mettent en évidence les répercussions au niveau cardiaque des phénomènes associés de changement de support et de différenciation des rôles. L'augmentation des contraintes pour l'équipier Tornadiste appelle à reconsidérer à la hausse la pondération de l'entraînement physique en HC16. Similairement, la dimension transitoire du F18 apporte une aide au passage à l'olympisme.

La perspective d'une modélisation électrophysiologique et biomécanique, apporterait une meilleure compréhension des tenants et des aboutissants de l'activité physique en catamaran de sport.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Portier, H., & Guézennec, C.Y. (2002). Estimation de la dépense énergétique lors d'une régata en dériveur. *Science & sports*, 18, 111-113.
- [2] Blackburn, M. (1994). Physiological responses to 90 min of simulated dinghy sailing. *Journal of Sports Sciences*, 12, 383-390.
- [3] Larsson, B., Beyer, N. Bay, P., Blond, L., Aagaard, P., & Kejaer, M. (1996). Exercice Performance in Elite Male and Female Sailors. *Int. J. Sports Med*, 17, 504-508.
- [4] Felici, F., Rodio, A., Madaffari, A., Ercolani, L., & Marchetti, M. (1999). The cardiovascular work of competitive dinghy sailing. *J sports med phys fitness*, 39, 309-14.
- [5] Legg, S., Mackie, H., & Smith, P. (1999). Temporal patterns of physical activity in Olympic dinghy racing. *J sports med phys fitness*, 39, 315-20.
- [6] Guével, A. (1995). Rappels des principes fondamentaux en programmation et planification de l'entraînement physique. Rapport. Faculté des sciences du sport, Université d'Aix Marseille.
- [7] Maïsetti, O., Guével, A. Iachchikine, P., Legros, P., & Briswalter, J. (2002). Le maintien de la position de rappel en dériveur solitaire. Aspects théoriques et propositions méthodologiques d'évaluation de la fatigue musculaire, *Science & Sports*, 17, 234-246.
- [8] Vogiatzis, I., Spurway, N.C., Jenet, S., Wilson, J., & Sinclair, J. (1996). Changes in ventilation related to changes in electromyograph activity during repetitive bouts of isometric exercise in simulated sailing. *Eur J Appl Physiol*, 72, 195-203.
- [9] De Vito, G. Di Filippo, L., Felici, F., Gallozzi, C., Madaffari, A., Marino, S., & Rodio, A. (1996). Assessment of energetic cost in Laser and Mistral sailor, *Int J of Sports Cardiol*, 5, 55.

- [10] Castagna, O., Guézennec, C.Y., Jaunet Devienne, M.F., Lacour, J.R., & Brisswalter, J. (2004). Analyse de la sollicitation physiologiques lors de la navigation en Laser, *Science & sports*, 19, 317-323.
- [11] Iaiche, R., Toraa, M., & Friemel, F. (1996). Evaluation de VO₂ maxet de VMA, en laboratoire et sur le terrain, *Science & Sports*, 11, 91-95.
- [12] Bernard, T., Falgairette, G., Gavarry, O., Bermon, S., & Marconnet, P. (1996). Intérêt de la fréquence cardiaque pour évaluer la consommation d'oxygène en situation non stable d'exercice et au cours de la récupération, *Science & Sports*, 11, 96-103.
- [13] Guével, A.(1997). Evaluation des sollicitations physiologiques en planche à voile olympique. Incidence des changements réglementaires. Conséquences sur l'entraînement. Thèse. Faculté des sciences du sport, Université d'Aix-Marseille.
- [14] Mille-Hamard, L., Laffite, L. Demarle, A., Koralsztein, J.P, & Billat, V.L. (1999). Oxygen-pulse steady state allows to estimate VO₂ by heart rate monitoring in a severe submaximal run, *Science et motricité*, 38-39.
- [15] Chatard, J.C. (1998) Intérête des mesures de fréquence cardiaque, *revue EPS*, n°273.
- [16] Papelier, Y., Cottin, F. (1997). La mesure de la fréquence cardiaque, un outil à manier avec discernemen, *revue EPS*, n°267.
- [17] Saint Pierre, & F., Brackmann, J.P. (2004). Fréquence cardiaque chez le sportif amateur.
- [18] Monier, G. (1987) Analyse des facteurs de la performance en planche à voile et approfondissement de certains contenus de préparation à la compétition. Etude spécialisé, professorat de sport, ENV Quiberon.
- [19] Monier, G. (1999). Traitement de l'information en voile de compétition : positionnement du questionnaire, revue de littérature préalable à une action de recherche, *cahiers de l'ENV*.

- [20] Houvenaeghel, M., Bizzari, C., Giallurachis, D., & Demelas, J.M. (2005). Mesure continue de la fréquence cardiaque en entraînement spécifique de judo, *Science & sports*, 20, 27-32.
- [21] Deroanne, R. (1996). Comportement cardiaque des athlètes à l'entraînement et en compétition, *revue sport*, 154, 32-36.
- [22] Plyley, M.J., Davis, G.M., & Shephard, R.J. (1985). Body Profil of Olympic-Class Sailors, *The physician and sportmedecine*, 13, 152-167.
- [23] Legg, S.J., Miller, A.B., Slyfield, D., Smith, P., Gilberd, C., Wilcox, H., & Tate, C. (1997). Physical performance of elite New Zealand Olympic class sailors, *J sports med phys fitness*, 37, 41-49.
- [24] Shepard, R.J. (1990). The Biology and Medecine of Sailing, *sports med*, 9, 86-99.
- [25] Shepard, R.J. (1997). The Biology and Medecine of Sailing an Update, *sports med*, 23, 350-356.

ANNEXES

1. Détail de la population expérimentale :

Prenom	Poste	Age	Poids	Taille	Série
Moana	Barreur	23	80	180	F 18
Romain	Equipier	23	64	176	
Thomas N	Barreur	20	68	176	
Brice	Equipier	20	79	181	

Julien	Barreur	18	72	175	HC 16
Martin	Equipier	17	65	182	
Guilhem	Barreur	18	72	178	
Gwénolé	Equipier	18	66	171	
Pierre	Barreur	18	70	182	
Lucas	Equipier	19	75	182	

Prénom	FC Max	FC Repos	VO2 Max	Fc seuil	PMA	Série
Moana	203	70	54,9	166	270	F 18
Romain	197	62	59,8	174	250	
Thomas N	193	63	67,2	164	300	
Brice	203	68	52,6	146	250	

Julien	186	64	57,6	169	250	HC 16
Martin	206	72	62,1	176	250	
Guilheme	206	69	58,7	184	250	
Gwénolé	206	73	53,7	173	250	
Pierre	187	62	67,9	160	300	
Lucas	203	68	56,8	184	250	

Prenom	Poste	Age	Poids	Taille	Série
Xavier R	Barreur	35	69	176	Tornado
Christoph E	Equipier	30	80	175	
Moana V	Barreur	23	80	180	
Mathieu V	Equipier	23	80	180	
Billy	Barreur	27	69	170	
Arnaud J	Equipier	30	79	193	

Prénom	FC Max	FC repos	VO2 Max	FC seuil	PMA	Série
Xavier R	179	51	58,2	nc	270	Tornado
Christoph E	186	55	61,3	nc	300	
Moana V	203	70	54,9	166	270	
Mathieu V	192	58	59,8	164	300	
Billy B	195	73	54,2	nc	250	
Arnaud J	185	60	57,6	nc	270	

2. Echelle d'état de la Mer (auteur : Philippe NEIRAS) :

DEGRE	ETAT DE LA MER	SENSATION / IMAGE
1	Mer « d'huile », lac : 0m	Maubuisson pétrole
2	Petit clapot et/ou début de houle: 0 à 0,3m	Hyères Thermique 10 nds Quiberon Ouest 15 nds
3	Clapot court formé et/ou houle plus marquée : 0,4 à 0,6m	Hyères Mistral 18 nds Medemblick 15 nds Quiberon ouest 25 nds Quiberon Est 15 nds
4	Très fort clapot court et haut et/ou forte houle : 0,7 à 0,9m	Medemblick 20 nds Hyères Est 18 nds Quiberon Sud Ouest 20 nds Quiberon Est 30nds
5	Mer forte 1 à 2 m et plus, déferlant avec clapot superposé ou croisé	Hyères Mistral 35 nds Hyères Est 23 nds Palamos 20 nds Sydney 20 nds Cadiz 30 nds

La zone de mesure étant le plan d'eau de Quiberon, l'état de la mer n'a jamais dépasser le degré 4 de l'échelle dans notre étude.

3. Signification du degré de corrélation en fonction du nombre

Table 9.1
Probability Levels for the Correlation Coefficient

One-Tailed Probabilities^a

N	.05	.025	.01	.005	.0005
5	.80	.88	.93	.96	.99
6	.73	.81	.88	.92	.97
7	.67	.75	.83	.87	.95
8	.62	.71	.79	.83	.93
9	.58	.67	.75	.80	.90
10	.55	.63	.71	.77	.87
11	.52	.60	.69	.73	.85
12	.50	.58	.66	.71	.82
13	.48	.55	.63	.68	.80
14	.46	.53	.61	.66	.78
15	.44	.51	.59	.64	.76
16	.43	.50	.57	.62	.74
17	.41	.48	.56	.61	.73
18	.40	.47	.54	.59	.71
19	.39	.46	.53	.57	.69
20	.38	.44	.52	.56	.68
22	.36	.42	.49	.54	.65
24	.34	.40	.47	.51	.63
26	.33	.39	.45	.50	.61
28	.32	.37	.44	.48	.59
30	.31	.36	.42	.46	.57
40	.26	.31	.37	.40	.50
50	.23	.28	.33	.36	.45
60	.21	.25	.30	.33	.41
80	.19	.22	.26	.29	.36
100	.17	.20	.23	.26	.32
250	.10	.12	.15	.16	.21
500	.07	.09	.10	.11	.15
1000	.05	.06	.07	.08	.10

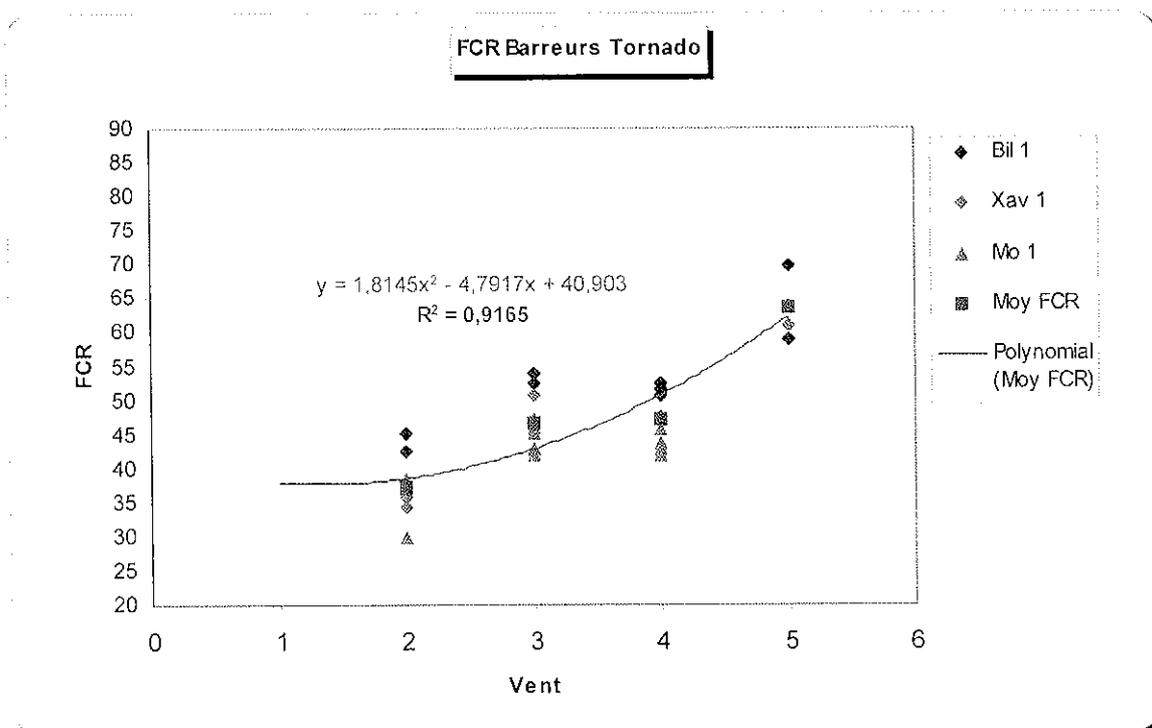
^aOne-tailed means the probability of a specific plus or minus correlation or greater. For the probability of an absolute correlation or greater, double the one-tailed probability.

N = number of cases. For partial correlation holding k variables constant, use $N - N^* - k$, where N^* is the number of cases for partial correlation.

4. Détails des résultats :

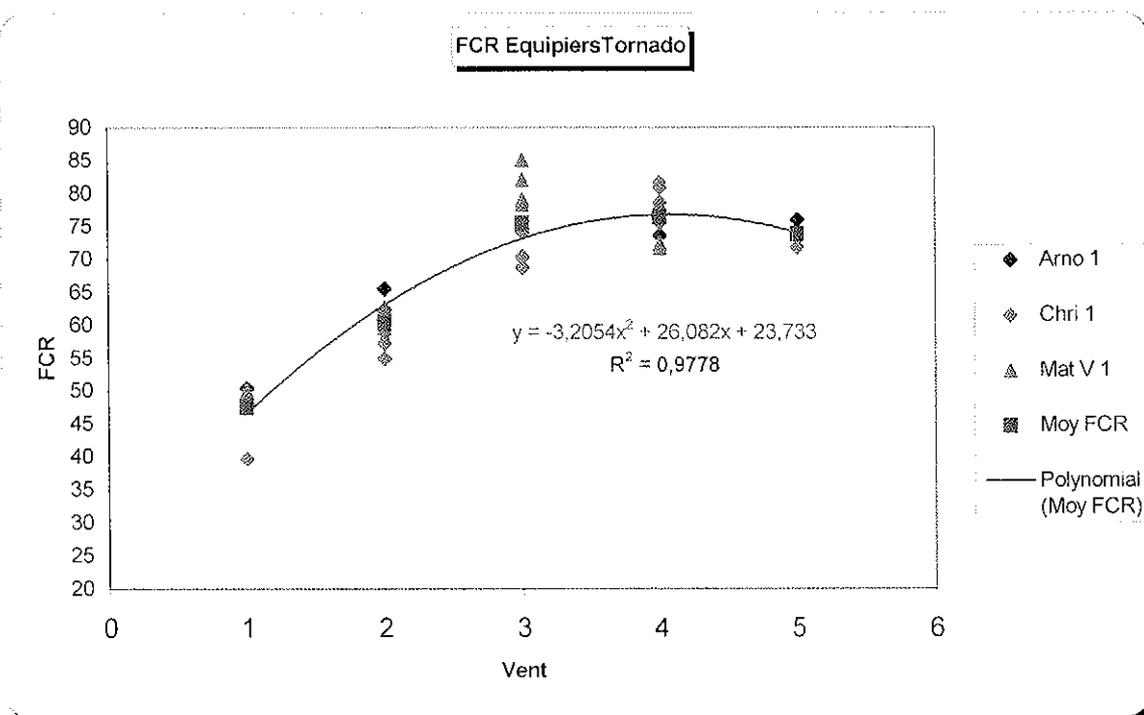
Barreurs Tornado													% FCR	
Vent en nœuds	Bil 1	2	3	4	Xav 1	2	3	Mo 1	2	3	4	5	Moy tot FCR	Ecart type
7 à 10	inf 37	inf 37	inf37	INF 37%										
11à 14	36,89	45,1	36,1	42,6	35,94	34,4		36,84	38,35	30,08			37,36	4,1
15à 18	52,46	54,1			42,19	45,3	51	47,37	42,11	45,11	42,86	42,86	46,51	4,2
19à 23	51,64	52,5	47,5	50,8				45,86	43,61	42,86	42,11		47,11	3,9
Sup à 23	59,02	69,7	63,9		60,94	64,1							63,52	3,6
Coeff de détermination : régression linéaire R ²													0,88	
Coeff de détermination : régression polynomiale R ²													0,92	
Différence													0,04	

FC brut en bpm												
Vent en nœuds	Bil 1	2	3	4	Xav 1	2	3	Mo 1	2	3	4	5
7 à 10												
11à 14	118	128	117	125	97	95		119	121	110		
15à 18	137	139			105	109	116	133	126	130	127	127
19à 23	136	137	131	135				131	128	127	126	
Sup à 23	145	158	151		129	133						



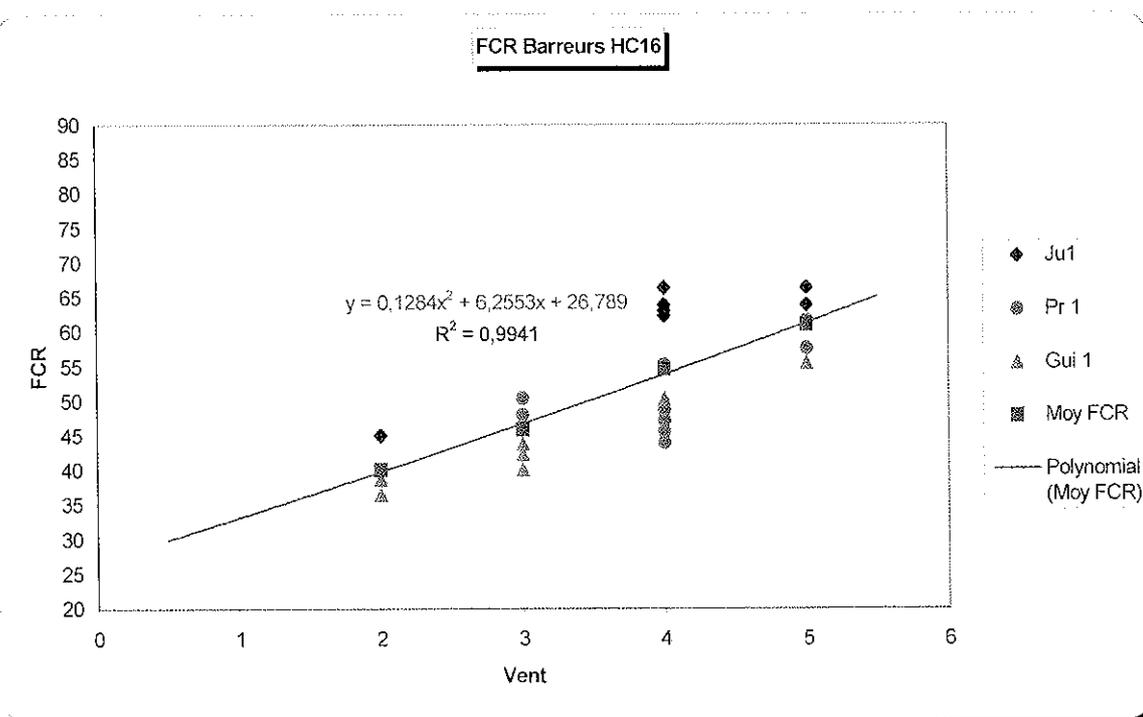
Equippers Tornado					% FCR											
Vent en nœuds	Arn 1	2	3	4	Chri 1	2	3	4	Mat 1	2	3	4	5	Moy tot FCR	Ecart type	
7 à 10	48,8	50,4			39,69	48,1			50	48,5				47,58	3,6	
11à 14	60,8	65,6	62,4	61,6	57,25	55			62,69	58,2	59,7			60,36	3,0	
15à 18	68,8	70,4			68,7	70,2	74	74	85,07	82,1	79,1	78,4	79,1	75,45	5,4	
19à 23	76,8	77,6	73,6	76	78,63	75,6	81,7	80,9	72,39	72,4	71,6	77,6	78,4	76,40	3,1	
Sup à 23	73,6	74,4	76		73,28	71,8								73,81	1,4	
Coeff de détermination : régression linéaire R ²													0,75			
Coeff de détermination: régression polynomiale R ²													0,98			
Différence													0,23			

FC brut bpm														
Vent en nœuds	Arn 1	2	3	4	Chri 1	2	3	4	Mat 1	2	3	4	5	
7 à 10	121	123			107	118			125	123				
11à 14	136	142	138	137	130	127			142	136	138			
15à 18	146	148			145	147	152	152	172	168	164	163	164	
19à 23	156	157	152	155	158	154	162	161	155	155	154	162	163	
Sup à 23	152	153	155		151	149								



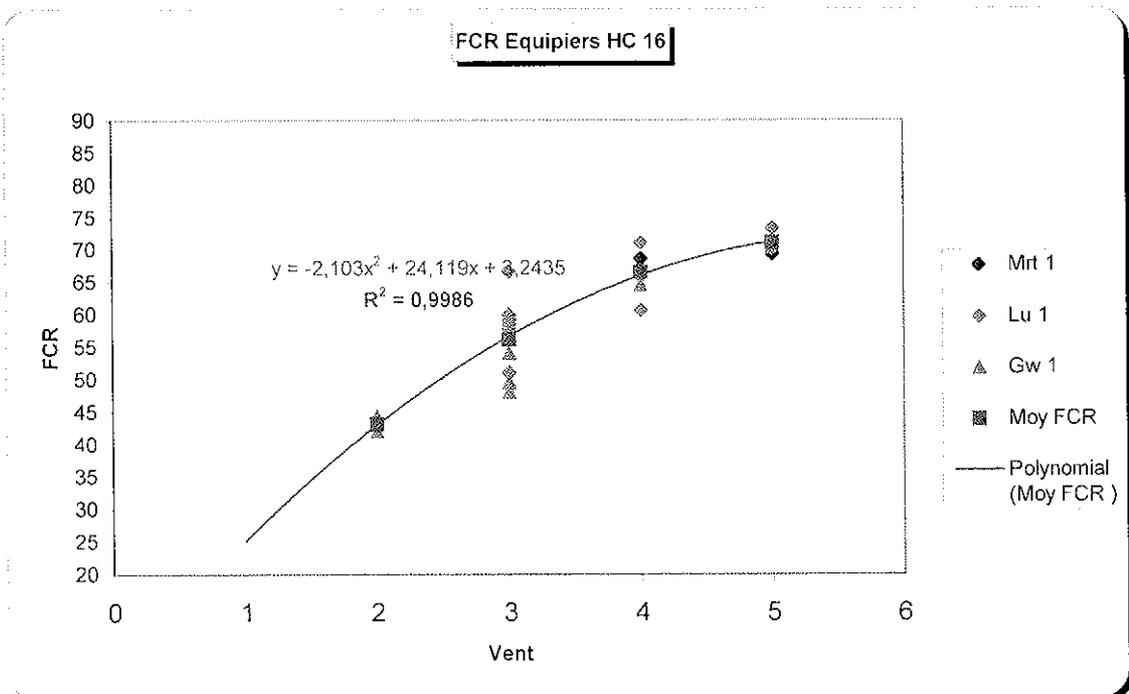
Barreurs HC 16				% FCR								Moy FCR	Ecart type	
Vent en nœuds	Ju1	2	3	4	Pr 1	2	3	4	5	Gui 1	2			3
7 à 10	inf37	inf37	inf3è	inf37	INF 37%									
11à 14	45,1									36,5	38,7		40,09	3,6
15à 18					46,4	48,0	50,4	48,0	48,0	40,1	42,3	43,8	45,88	3,2
19à 23	62,3	63,1	66,4	63,9	45,6	55,2	47,2	48,8	44,0	50,4			54,69	8,1
Sup à 23	63,9	66,4			57,6	61,6				55,5			61,00	4,0
Coeff de détermination : régression linéaire R ²												0,98		
Coeff de détermination : régression polynomial R ²												0,98		
Différence												0,00		

FC brut bpm												
Vent en nœuds	Ju1	2	3	4	Pr 1	2	3	4	5	Gu 1	2	3
7 à 10												
11à 14	119									119	122	
15à 18					120	122	125	122	122	124	127	129
19à 23	140	141	145	142	119	131	121	123	117	138		
Sup à 23	142	145			134	139				145		



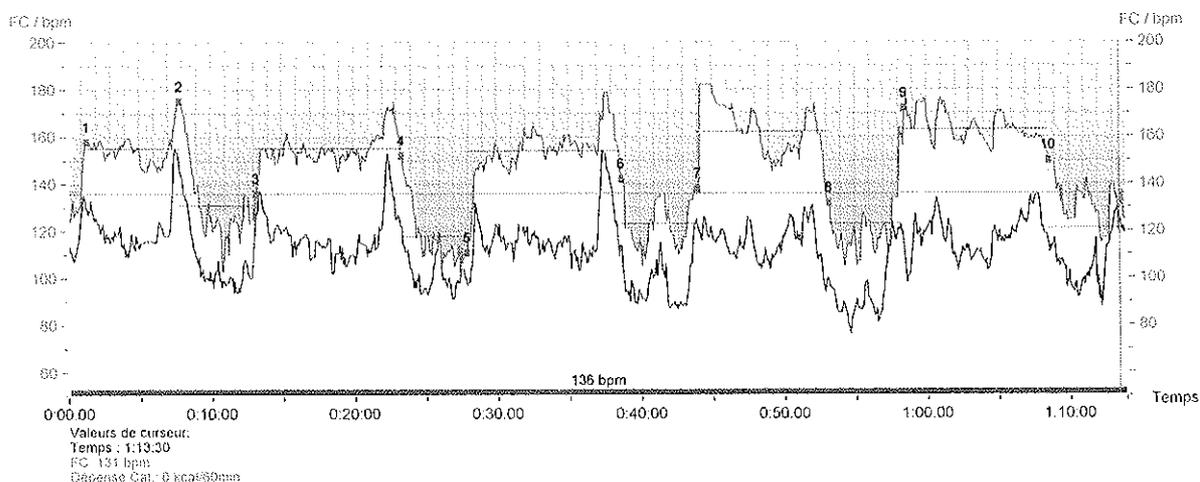
Equipers HC 16		% FCR													
Vent en nœuds	Mrt 1	2	3	4	5	Lu 1	2	3	3	4	Gw 1	2	3	Moy FCR	Ecart type
7 à 10	inf37	inf37	inf37	inf30		inf37	inf37	inf30	inf37	inf37	inf37	inf37	inf37	INF 37%	
11à 14	43,3										44,4	42,1		43,25	0,9
15à 18						59,3	60,0	58,5	66,7	57,8	54,1	49,6	48,1	56,76	5,6
19à 23	67,2	68,7	68,7			65,9	63,7	60,7	65,9	66,7	64,7			65,79	2,4
Sup à 23	69,4	67,9				70,4	67,4				63,2			67,65	2,5
Coeff de détermination : régression linéaire R ²														0,98	
Coeff de détermination : régression polynomial R ²														0,99	
Différence														0,01	

FC brut bpm														
Vent en nœuds	Mrt 1	2	3	4	5	Lu 1	2	3	3	4	Gw 1	2	3	
7 à 10														
11à 14	130										132	129		
15à 18						148	149	147	158	146	145	139	137	
19à 23	162	164	164	162	155	157	154	150	157	158	159			
Sup à 23	165	163				163	159				157			



5. Exemples caractéristiques de courbes de FC :

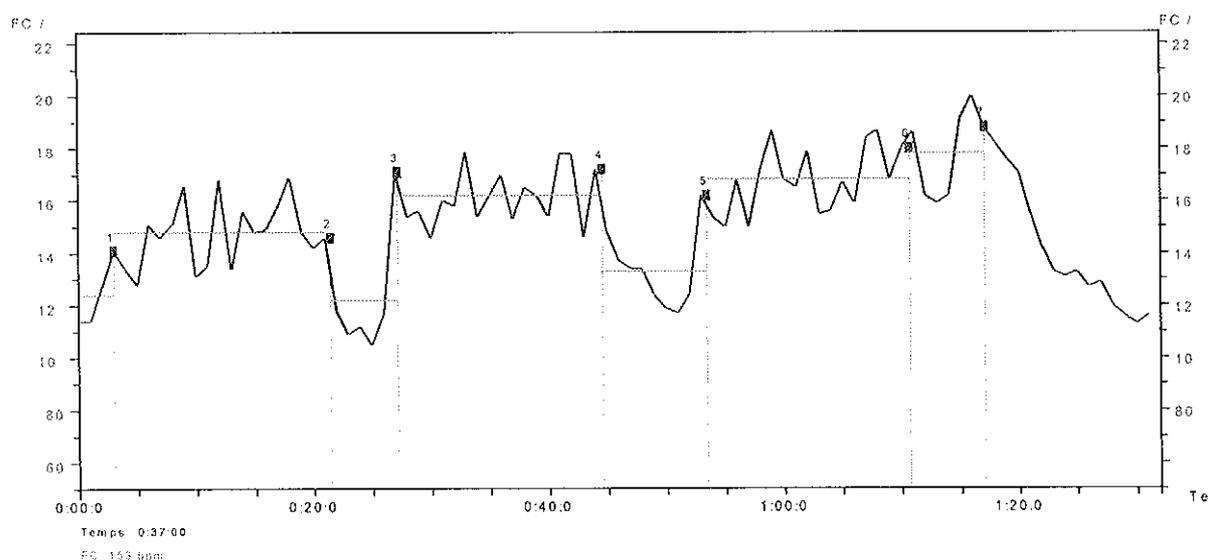
a. Succession de trois « speed test » au près et de deux « speed test » au portant :



Nom	Exercice	Date	Curseur FC	FC	Durée	Note
---	jack cadix 18 20 nds mer 5	20/02/2006	131	136 / 182	2:02:23.0	
---	Moana cadix 18 20 nds mer 5	20/02/2006	127	110 / 155	3:51:30.8	

On observe un pic de Fc à la fin de chaque près qui résultent de la manœuvre d'arrêt du bateau. Le portant est caractérisé par deux pics au début et à la fin de l'exercice, qui représentent les manœuvres d'envoie et d'affalé de spi.

b. Succession de trois manches d'un équipier en Tornado dans 15 à 18 nœuds de vent :



Les moyennes de FC sont : manche 1 = 149 ; manche 2 = 161 ; manche 3 = 164. L'augmentation est de 12,08 % entre la première et la troisième manche. Ce sont des manches d'entraînement d'une durée moyenne de 18,5 min \pm 2,3.

RESUME

Sujet : Etude des sollicitations cardiaques en catamaran de sport (Junior et Olympique). Au service d'une analyse technologique et anthropologique de la filière catamaran de sport.

Objectif : Comparer les exigences relatives aux supports pratiqués et analyser les répercussions des rôles au sein de l'équipage. Evaluer ensuite l'intérêt de l'entraînement physique et de la pratique transitoire en F18. Déterminer en filigrane un profil type des coureurs en Tornado.

Matériel et méthode : Six sujets en Tornado ainsi que six sujets en Hobie Cat 16 ont fait l'objet d'une étude sur la fréquence cardiaque (FC) en navigation sur ces catamaran de sport. Les mesures ont été recueillies lors de manches d'entraînements de 20 min ($\pm 5,2$), grâce à des cardio-fréquences mètres « *polar s610i* ». Les données ont été répertoriés suivant des gammes de vent croissantes.

Résultats : Les valeurs de FC brutes ont été converties en pourcentage de fréquence cardiaque de réserve (%FCR). Le premier résultat est une corrélation significative entre l'augmentation de la force du vent et l'augmentation du %FCR. Ensuite, la comparaison des courbes de %FCR selon les gammes de vent, montre des sollicitations croissantes du HC16 vers le Tornado et du barreur vers l'équipier. En dernier lieu, la sollicitation cardiaque des équipiers en Tornado est semblable à celle des coureurs en Laser.

Discussion :

Les résultats ont permis de quantifier partiellement l'effort en catamaran de sport, particulièrement grâce à la comparaison avec d'autres travaux utilisant la FC pour étudier les exigences de l'activité voile.

L'interprétation des résultats met en évidence les conséquences au niveau cardiaque des phénomènes associés de changement de support et de différenciation des rôles. L'augmentation des contraintes pour l'équipier Tornadiste appelle à reconsidérer à la hausse la pondération de l'entraînement physique en HC16 dans l'optique dans changement de support. Similairement, la dimension transitoire du F18 apporte une aide au passage à l'olympisme.

Mots clés : Fréquence cardiaque, catamaran, technologie, anthropologie.

ABSTRACT

Subject : Study the heart expenditures in sport catamaran sailing (youth and olympic). Then complete these data by a technological and anthropological analysis of this sports catamaran group.

Objectives : Compare these sports cat group physical requirements in order to determine crew different duties. Then value the advantage in the temporary physical training and practice in F18. Determine between the line the profile type of Tornado racer.

Material and method : Six subject in tornado and in HC16 has been an object of a study on heart rate in sport cat sailing. The measures has been recorded with heart frequencies meters polar s610i during trainig matches of 20min ($\pm 5,2$). The data has been classed following increasing range of wind speed.

Results: Heart rate raw values has been converted into a percentage of heart rate (%HR). The first result is a significant correlation between the increasing of the wind speed and the increasing of the %HR. HR curves comparisons show up some increasing demands according from HC16 to Tornado and from the skipper to the crew. Finally heart demand in tornado is similar to laser's one racers.

Discussion: Results enabled to partly quantify the effort in sport cat particularly grace of the comparison with other works using HR to study sailing activities requirements. Results interpretation shows up that changing the boat type or the sailing job induces cardiac consequences. The increasing stress upon the Tornadist crew, shows that the physical training must be enhanced for HC16 crew intending to join Tornado team. As well, the middle position of the F18, is a good help for olympic purpose transition.

Key words : Heart rate, catamaran, tecnology, athropology.